

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Flávio Duarte Couto Oliveira

Limitador de Corrente de Falta Supercondutor

**VITÓRIA
2005**

Flávio Duarte Couto Oliveira

Limitador de Corrente de Falta Supercondutor

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica, na área de concentração em Automação.

Orientador: Prof. Dra. Jussara Farias Fardin

Co-orientador: Prof. Dr. Domingos Sávio Lyrio Simonetti

VITÓRIA
2005

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

O481 Oliveira, Flávio Duarte Couto, 1978-
Limitador de corrente de falta supercondutor / Flávio Duarte Couto
Oliveira. – 2005.
82 f. : il.

Orientadora: Jussara Farias Fardin.
Co-Orientador: Domingos Sávio Lyrio Simonetti.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo,
Centro Tecnológico.

1. Supercondutividade. 2. Supercondutividade de alta temperatura. 3.
Aparelhos e materiais elétricos - Proteção. 4. Cerâmica. 5. Curtos-circuitos
I. Fardin, Jussara Farias. II. Simonetti, Domingos Sávio Lyrio. III.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 621.3

Flávio Duarte Couto Oliveira

Limitador de Corrente de Falta Supercondutor

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisição parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica - Automação.

Aprovada em 16 de dezembro de 2005.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dra. Jussara Farias Fardin
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. Domingos Sávio Lyrio Simonetti
Universidade Federal do Espírito Santo
Co-orientador

Prof. Dra. Patricia Romeiro da Silva Jota
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Marcos Tadeu D'Azeredo Orlando
Universidade Federal do Espírito Santo

Dedico esta dissertação a meus pais, cujo exemplo de honestidade e trabalho tem sido um norteador para a minha vida, e à minha noiva, Kamila Pereira Silva, que tem me apoiado nos momentos mais difíceis e mostrado a simplicidade de ter esperança.

Agradecimentos

Aos professores Dra. Jussara Farias Fardin, Dr. Domingos Sávio Lyrio Simonetti e Dr. Marcos Tadeu D'Azeredo Orlando pela orientação e incentivo;

À equipe do Laboratório PRESLAB e Laboratório de Difração de Raio-X do Departamento de Física da UFES;

À equipe do Laboratório LEPAC do Departamento de Engenharia Elétrica da UFES;

Aos colegas José Luis Passamai Júnior, Paulo Cesar Martins e Carlos Augusto Cardoso Passos;

À todos os colegas do Mestrado e Doutorado em Engenharia e Física da UFES;

Ao CNPq.

Sumário

1	Introdução	16
1.1	Localização Temática	16
1.2	Limitadores de Corrente	17
1.2.1	Limitadores de Corrente Supercondutores	18
1.3	Objetivos	19
1.4	Desenvolvimento da dissertação	19
2	Dispositivos Limitadores de Corrente de Falta	20
2.1	Reator Limitador de Núcleo de Ar	21
2.2	Dispositivo Pirotécnico	22
2.2.1	Algumas Aplicações	23
2.3	Dispositivo com Tecnologia FACTS	24
2.3.1	Capacitor série controlado por tiristor - TCSC	25
2.3.2	Dispositivo Limitador de Corrente combinando um TPSC e um reator	26
2.4	Disjuntores Eletrônicos de Abertura Rápida	26
2.5	Controlador de Potência Interfases	27
2.6	Limitador de Corrente de Falta Supercondutor	29
2.6.1	Limitador de corrente de falta supercondutor do tipo resistivo	29
2.6.2	Limitador de corrente de falta supercondutor do tipo indutivo	30

2.6.3	Limitador de corrente de falta supercondutor do tipo ponte	31
2.6.4	Limitador de corrente de falta supercondutor do tipo fluxo fechado .	32
2.7	Vantagens	35
2.8	Conclusões	36
3	Supercondutividade	37
3.1	Descoberta da Supercondutividade e Evolução Histórica	37
3.2	Propriedades Magnéticas	40
3.2.1	Destruição da supercondutividade por meio de campo magnético . .	40
3.2.2	Efeito Meissner	41
3.2.3	Estado Misto	45
3.2.4	Irreversibilidade magnética	46
3.2.5	Profundidade de Penetração	47
3.2.6	Comprimento de Coerência	50
3.2.7	Supercondutor do tipo I e supercondutor do tipo II	52
3.3	Teoria BCS	53
3.3.1	A interação Elétron-Rede	53
3.3.2	Resistividade nula e pares de Cooper	55
3.4	Conclusões	55
4	Produção das Cerâmicas Supercondutoras	56
4.1	Síntese das cerâmicas supercondutoras	56
4.2	Medidas de Corrente Crítica	57
4.3	Análise de Corrente Crítica	58
4.4	Conclusão	59

5	Projeto do Protótipo de Limitador de Corrente de Falta Resistivo	60
5.1	Introdução	60
5.2	Levantamento dos dados necessários para realização do projeto	60
5.2.1	Raio-x	60
5.2.2	Susceptibilidade	61
5.2.3	Curva de Densidade de Corrente Crítica	63
5.2.4	Curva de Resistividade	64
5.3	Confecção do Protótipo	65
5.3.1	Autenticidade das cerâmicas supercondutoras	65
5.3.2	Determinação da Temperatura Crítica da Cerâmica	65
5.3.3	Determinação da área da cerâmica supercondutora do protótipo	65
5.3.4	Determinação do comprimento da cerâmica supercondutora do protótipo	66
5.3.5	Ponta de fixação da cerâmica supercondutora	66
5.3.6	Montagem do dispositivo	67
5.4	Conclusão	69
6	Ensaio e resultados do protótipo	70
6.1	Introdução	70
6.2	Montagem da bancada de ensaio do protótipo	70
6.3	Ensaio Realizados	72
6.3.1	Condição Normal de operação	72
6.3.2	Condição de operação sob falta	72
6.3.3	Manutenção das propriedades da cerâmica supercondutora	74
6.4	Discussão dos Resultados	75
7	Conclusões	77
7.1	Próximos trabalhos	78

Lista de Figuras

2.1	Reator limitador de corrente da subestação de Tucuruí 500 kV.	21
2.2	Limitador de Corrente de Falta Pirotécnico da G&W Eletric de 38KV e 2500A.	22
2.3	Esquema de um limitador de corrente de falta pirotécnico.	23
2.4	Esquema de um limitador de corrente de falta pirotécnico em paralelo com um reator limitador de corrente.	24
2.5	Esquema de um dispositivo TCSC.	25
2.6	Esquema de um dispositivo limitador baseado no TPSC.	26
2.7	Circuito equivalente do IPC com 2 ramos.	27
2.8	Limitador de corrente de falta supercondutor do tipo resistivo (DLCFS).	30
2.9	Circuito elétrico equivalente de DLCFS do tipo resistivo.	30
2.10	Esquemático de um DLCFS tipo indutivo.	31
2.11	Circuito elétrico equivalente de DLCFS do tipo ponte.	32
2.12	DLCFS do tipo fluxo fechado.	33
2.13	Circuito elétrico equivalente de DLCFS do tipo fluxo fechado.	34
3.1	Diagrama de fase de um supercondutor.	40
3.2	Diagrama típico da relação entre Temperatura - Campo Magnético - Densidade de Corrente.	41
3.3	Comportamento magnético de um condutor perfeito.	43
3.4	Comportamento magnético de um supercondutor.	44

3.5	Variação da magnetização em função do campo magnético em materiais supercondutores do tipo I(a) e tipo II(b).	45
3.6	Estado misto, mostrando os vórtices de supercondutores.	45
3.7	Grupo de vórtices vistos por cima. a) Arranjo ordenado triangular, chamado de Rede de Abrikosov, b) arranjo irregular de vórtices.	46
3.8	Magnetização de supercondutor do tipo II.	46
3.9	Magnetização de supercondutor do tipo II em materiais reais.	47
3.10	Penetração do fluxo magnético no interior de um supercondutor.	50
3.11	Profundidade de penetração e comprimento de coerência no limite da superfície de um supercondutor do tipo I e do tipo II.	52
4.1	Curva da dependência da densidade de corrente crítica em função $t(T/T_C^*)$ para as amostras com diferentes teores de oxigênio.	58
4.2	Densidade de corrente crítica normalizada ($J_C/J_C(0)$) em função da temperatura normalizada (T/T_C^*) da amostra B.	59
5.1	Raio-x da amostra.	61
5.2	Mostra o esquemático de um Susceptômetro.	62
5.3	Susceptibilidade magnética.	62
5.4	Densidade de corrente crítica (J_C) em função da temperatura (T)	63
5.5	Resistividade (ρ) em função da temperatura (T).	64
5.6	Ponta de fixação da cerâmica supercondutora.	67
5.7	Ponta de fixação da cerâmica supercondutora com a haste.	67
5.8	Vista de lado da bancada do limitador de corrente.	68
5.9	Vista de frente da bancada do limitador de corrente.	68
6.1	Bancada de ensaio.	71
6.2	Ensaio de um curto circuito sem o limitador de corrente.	72

6.3	Ensaio de curto circuito com o limitador de corrente $R_{carga} = 20\Omega$ e $R_{falta} = 4\Omega$	73
6.4	Ensaio de curto circuito com o limitador de corrente $R_{carga} = 20\Omega$, $R_{falta} = 4\Omega$ e restauração da condição normal de operação.	73
6.5	Ensaio de curto circuito com o limitador de corrente $R_{carga} = 20\Omega$ e $R_{falta} = 1\Omega$	74
6.6	Ensaio de curto circuito com o limitador de corrente $R_{carga} = 20\Omega$ e $R_{falta} = 1\Omega$ e falta em outro ponto da senóide da tensão de alimentação.	74
6.7	Susceptibilidade magnética AC antes e depois dos testes.	75

Resumo

O projeto e construção de um dispositivo limitador de corrente de falta (DLCF) supercondutor (DLCFS) do tipo resistivo é o propósito desta dissertação. A cerâmica supercondutora usada no dispositivo é a $Hg_{0,82}Re_{0,18}Ba_2Ca_2Cu_3O_{8+\delta}$, cuja fabricação é feita na UFES. Sua principal característica é a alta temperatura crítica que apresenta, $-143^{\circ}C$ sob pressão normal, podendo ser resfriada por nitrogênio líquido ($-196^{\circ}C$).

O trabalho apresenta uma discussão sobre os diversos tipos de DLCFs e uma revisão dos conceitos da teoria da supercondutividade, descrevendo as principais curvas características. Também é apresentado: o processo de fabricação da cerâmica e uma metodologia para o projeto do limitador baseada nas curvas características da cerâmica supercondutora utilizada.

O desempenho do dispositivo é testado sob várias condições de falta, não apresentando degradação das propriedades supercondutoras da cerâmica. Os resultados obtidos são satisfatórios levando à conclusão que a metodologia adotada para o projeto e o processo de construção do dispositivo foram adequados e que a cerâmica usada é promissora para aplicações desta natureza.

Abstract

The goal of this work is to present a resistive superconductor fault current limiter. For this study was used a SFCL based on $Hg_{0.8}Re_{0.2}Ba_2Ca_2Cu_3O_{8+\delta}$ (Hg-1223) ceramic made in High Pressure Lab - UFES. Among all the high T_c superconductor cuprates, the Hg-1223 compound has record transition temperature, *i.e.*, $T_c = 135$ K under normal pressure. To this aim, the work shows a discussion about fault current limiters and a heuristic review of superconductor theory describing the principal characteristics. Furthermore, sample preparation as well a design methodology for a resistive type limiter are described here. The performance of the device is evaluated under several fault conditions. It has been verified that intense over-current did not cause loss of sample stoichiometry showing the viability of this type of device for future application.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Localização Temática

A eletricidade entrou no Brasil no final do século 19, através da concessão de privilégio para a exploração da iluminação pública, dada pelo Imperador D. Pedro II a Thomas Edison. Em 1930, a potência instalada no Brasil atingia cerca de 350 MW, em usinas hoje consideradas como de pequena potência, pertencentes a indústrias e a Prefeituras Municipais, na maioria hidroelétricas operando a fio d'água ou com pequenos reservatórios de regularização diária. Em 1939, no Governo Vargas, foi criado o Conselho Nacional de Águas e Energia, órgão de regulamentação e fiscalização, mais tarde substituído pelo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica, DNAEE, subordinado ao Ministério de Minas e Energia. A primeira metade do século 20 representa a fase de afirmação da geração de eletricidade como atividade de importância econômica e estratégica para o País[17].

A partir do fim da Segunda Guerra Mundial, o Sistema Elétrico ganhou impulso com a construção da primeira grande usina, a de Paulo Afonso I, com a potência de 180 MW, seguida pelas usinas de Furnas, Três Marias e outras, com grandes reservatórios de regularização plurianual. No final da década de 60, foi criado o Grupo de Coordenação de Operação Interligada, tomando corpo o sistema nacional interligado.

Nos seus 100 anos de existência, o Sistema Elétrico Brasileiro, predominantemente hídrico (88% da potência e 94% da energia gerada em 1999), gerou cerca de 5.000 TWh, quantidade de energia que, na geração exclusivamente térmica, corresponderia a mais da metade da reserva brasileira de petróleo, avaliada em 20 bilhões de barris. Nesse século, o Sistema Elétrico Brasileiro passou por períodos com diferentes taxas de crescimento. O crescimento da demanda do sistema elétrico do Brasil e de diversos países do mundo tem

sido cada vez mais intenso nas últimas décadas, bem como o número de interligações entre diferentes sistemas de geração tem aumentado bastante e tende a crescer cada vez mais. O aumento da capacidade de geração, a elevação dos níveis de tensão, reforços no sistema de transmissão, instalação de novas linhas, instalações de dispositivos FACTS ("Flexible AC Transmission Systems") para aumentar a capacidade do sistema e fechamento de anéis alimentadores demandam novas tecnologias. Devido a isso, há um crescimento dos níveis de corrente de curto-circuito nas diversas barras, superando a capacidade dos dispositivos de proteção instalados e dos equipamentos ligados ao sistema, incapazes de suportarem os esforços eletromecânicos durante a ocorrência de defeitos. As correntes de curto-circuito têm aumentado, chegando a valores superiores a 10 vezes o valor das correntes nominais, levando à necessidade de substituir os equipamentos de manobra por outros de maior capacidade, dividir o sistema de transmissão em subsistemas e introduzir transformadores de impedância mais alta. Essas alternativas porém, criam outros problemas como perda de segurança e de confiabilidade, aumento das perdas de potência e custos altos. Com isso, vem crescendo a necessidade de se estudar dispositivos capazes de reduzir os níveis de curto-circuito bem antes que os dispositivos de proteção atuem, e que não influenciem na operação normal do sistema, operando o sistema com baixa impedância e baixos níveis de corrente de falta, ou curto-circuitos.

1.2 Limitadores de Corrente

Existem algumas soluções comuns para a limitação de corrente elétrica [27], por exemplo, a instalação de reatores em série, classificado entre os dispositivos chamados de limitadores de correntes de falta (DLC). Esta solução causa problemas como queda de tensão, perdas por efeito Joule e elevados fluxos magnéticos, porém só não tornando inviável sua aplicação porque seus efeitos podem ser compensados economicamente ao se evitar a substituição de equipamentos sobrecarregados.

Existem ainda outros tipos de limitadores, como dispositivos eletrônicos de potência com reatores série convencionais ou uma combinação de capacitores e reatores, dispositivos pirotécnicos e dispositivos limitadores de corrente de falta supercondutor.

Entre os limitadores de corrente existentes, os dispositivos limitadores de corrente falta supercondutores (DLCFS) apresentam um comportamento elétrico muito próximo do ideal, combinando características que não podem ser fornecidas por dispositivos convencionais.

1.2.1 Limitadores de Corrente Supercondutores

A pesquisa por materiais supercondutores de altas temperaturas (High Temperature Superconductor-HTSC) vem aumentando a área de aplicação de dispositivos que usam este material.

Os primeiros supercondutores precisavam ser resfriados em temperaturas muito baixas, chegando a 4,2K usando hélio líquido para resfriar o supercondutor. O custo do sistema criogênico necessário para manter o material no estado supercondutor era muito alto, inviabilizando sua aplicação. Em 1986, foram descobertos os supercondutores de altas temperaturas: os supercondutores cerâmicos podem ser mantidos no estado supercondutor em temperaturas de 77K, podendo ser usado no processo de resfriamento o nitrogênio líquido, diminuindo o custo do sistema criogênico. Desde então houve um grande progresso no desenvolvimento de aplicações de materiais supercondutores em sistemas de energia [6, 38]. O primeiro DLCFS foi instalado na Suíça, em uma planta industrial de 10,5kV, com uma potência instalada de 1,2MVA.

Existem quatro arquiteturas principais de limitadores de corrente de falta supercondutor: tipo resistivo, tipo indutivo, híbrido e de fluxo fechado. Dentre estas quatro arquiteturas, o limitador de corrente de falta resistivo apresenta menor peso, volume, perdas, potência de refrigeração, investimentos e custos operacionais em relação aos outros dispositivos limitadores de corrente de falta.

O limitador resistivo é adicionado diretamente no percurso da corrente de curto-circuito, e as correntes normais e as de curto-circuito circulam pelo supercondutor. Se a corrente excede um certo limite, o supercondutor perde sua capacidade de supercondução muito rápido e retorna ao estado de condutor normal, aumentando a sua resistência e limitando efetivamente a corrente de falta, preservando os equipamentos e reduzindo custos devido à substituição de equipamentos de manobra.

Dentro do contexto apresentado, este trabalho propõe o desenvolvimento de um DLCFS tipo resistivo. Um protótipo será projetado e testes serão feitos para avaliar o desempenho do dispositivo em relação à redução da corrente de curto-circuito.

A cerâmica supercondutora usada no protótipo, $Hg_{0,82}Re_{0,18}Ba_2Ca_2Cu_3O_{8+\delta}$, que apresenta alta temperatura, é produzida pelo Laboratório de Altas Pressões - PresLab do Departamento de Física da Universidade Federal do Espírito Santo - UFES.

1.3 Objetivos

Neste trabalho serão abordados os dispositivos limitadores de corrente e dentre eles, o dispositivo limitador de corrente supercondutor tipo resistivo. Os objetivos a serem atingidos são:

- desenvolver uma metodologia, não conhecida, para o projeto do DLCFS baseada nas curvas características da cerâmica supercondutora usada;
- projetar, testar o protótipo e avaliar seu desempenho;
- descrever o processo de fabricação da cerâmica $Hg_{0,82}Re_{0,18}Ba_2Ca_2Cu_3O_{8+\delta}$ de propriedades supercondutora;
- realimentar o processo de fabricação da cerâmica e levantar os novos pontos a serem investigados no uso do supercondutor em DLCs.

1.4 Desenvolvimento da dissertação

O desenvolvimento da dissertação será feito em 7 capítulos contando com este na qual foi feita a introdução ao tema abordado. No Capítulo 2 serão apresentados os dispositivos limitadores de corrente, entre eles aqueles que usam supercondutores, objetivo deste trabalho. Os capítulos 3 e 4 tratam da supercondutividade, sendo esta apresentada no Capítulo 3 e a produção da cerâmica supercondutora usada no dispositivo, descrita no Capítulo 4. O projeto do dispositivo limitador de corrente é apresentado no Capítulo 5 e no Capítulo 6 são discutidos os ensaios e apresentados os resultados do desempenho do dispositivo. As conclusões seguem no Capítulo 7.

O autor participou de todos os ensaios necessários para o desenvolvimento desta dissertação, incluindo os que caracterizam as propriedades da cerâmica supercondutora.

Capítulo 2

Dispositivos Limitadores de Corrente de Falta

Uma crescente expansão do sistema de distribuição e geração de energia elétrica tem elevado os níveis de curto-circuito excedendo a capacidade nominal do sistema, havendo uma necessidade de implantação de técnicas para nova adaptação do sistema, como:

- recapacitação das subestação e dos equipamentos;
- introdução de conexões de tensões mais altas (CA e CC);
- utilização de transformadores de impedância mais alta e de reatores série de núcleo de ar;
- adoção de estratégias complexas de chaveamento seqüencial.

Estas alternativas podem criar outros problemas como redução da segurança e confiabilidade, custos elevados e aumento das perdas na rede. Devido a esses problemas, tem crescido o interesse em estudos de dispositivo que limitam os níveis de curto-circuito. As principais características desejáveis desse dispositivos são:

- impedância baixa sob condição normal de operação;
- impedância alta sob condição de falta;
- transição rápida do modo normal para o modo limitador;
- recuperação rápida do modo normal depois da interrupção de uma falha;

- alta confiabilidade durante longos períodos, com manutenção mínima;
- volume e peso limitados.

Entretanto, limitador de nível de curto-circuito ideal não existe. Porém qualquer dispositivo prático deve satisfazer à exigências ideais até onde possível.

Alguns dispositivos já estão disponíveis para aplicação, como o reator com núcleo de ar, dispositivos pirotécnicos, IPC (*Interphase Power Controller*), dispositivo com tecnologia FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) e os dispositivos supercondutores.

Nos itens seguintes serão detalhados as principais características, aplicações, funcionamento, vantagens e desvantagens dos principais dispositivos limitadores de corrente de falta.

2.1 Reator Limitador de Núcleo de Ar

O reator limitador de corrente de falta de núcleo de ar, ou RLC, é o limitador de corrente de tecnologia mais antiga usado para reduzir as correntes de falta. Os RLCs podem ser aplicados no nível de 13,8kV, em serviços auxiliares de usinas e subestações, até em sistemas de 138kV, 345kV e 500kV. Algumas subestações no Brasil, como é mostrado na figura 2.1, utilizam este limitador, tais como [10]:



Figura 2.1: Reator limitador de corrente da subestação de Tucuruí 500 kV.

- Subestação de Jaguara 138kV (Minas Gerais);
- Subestação de Angra 138kV (Rio Janeiro);
- Subestação de Mogi das Cruzes 345kV (São Paulo);
- Subestação de Tucuruí 500kV (Pará).

As principais características deste dispositivo são:

- baixo custo;
- introduz perdas e as maiores quedas de tensão entre os dispositivos limitadores;
- necessidade de grande espaçamento, devido ao elevado campo magnético produzido.

A especificação do RLC é realizada fazendo um estudo de curto-circuito, fluxo de potência e os transitórios eletromagnéticos, sempre levando em consideração os limites de tecnologia de cada fabricante. Ainda deve-se fazer uma análise do ponto de vista econômico, comparando o custo da solução e a substituição dos equipamentos superados, levando em consideração o cálculo das perdas introduzidos no sistema.

2.2 Dispositivo Pirotécnico

Os dispositivos pirotécnicos interrompem as correntes de falta elevada em tempos menores que 1/4 de ciclo [9]. Dispositivos mecânicos, por exemplo disjuntores, não conseguem interromper correntes elevadas em tempos tão curtos.

Estes dispositivos são utilizados desde os anos 50, mas no Brasil só a partir dos anos 90 é que foram adotados por algumas empresas, como CSN, CENIBRA, ARACRUZ, ACESITA, MANENESMANN e CST Steel [10].



Figura 2.2: Limitador de Corrente de Falta Pirotécnico da G&W Eletric de 38KV e 2500A.

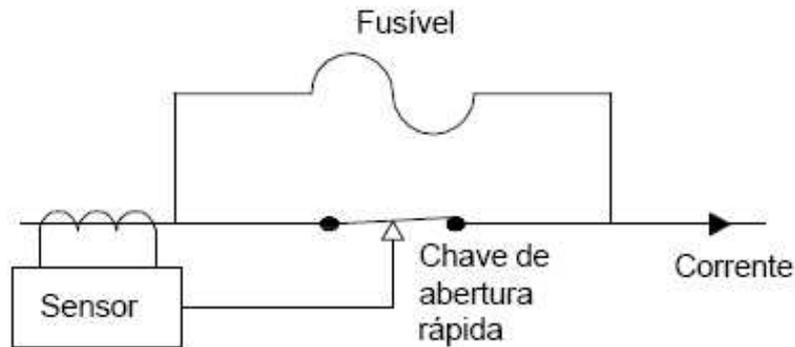


Figura 2.3: Esquema de um limitador de corrente de falta pirotécnico.

A Figura 2.2 apresenta um dispositivo do fabricante G&W Eletric. Os dispositivos pirotécnicos são constituídos por duas câmaras em paralelo, como é observado na Figura 2.3. Uma delas contém o condutor de cobre que conduz a corrente de carga normal. Nesta câmara são localizadas cargas explosivas, em estrangulamentos no condutor. Estas cargas são detonadas por sensores de corrente quando a corrente cresce bruscamente devido à ocorrência de uma falta. A outra câmara, em paralelo, é constituída de um elemento fusível, onde extingue a corrente de um curto em menos de $1/4$ de ciclo [9, 33].

A interrupção da falta separa a fonte de alimentação do sistema em curto. Para restabelecer o sistema é necessário a substituição do elemento fusível e da câmara do barramento de cobre.

Esse dispositivo não elimina a necessidade dos equipamentos de manobra convencionais dos circuitos, como chaves seccionadoras e disjuntores.

2.2.1 Algumas Aplicações

A necessidade de ampliação em subestações é comum, podendo levar à instalação de novos geradores que ocasionam uma elevação no nível de curto-circuito. Essa elevação pode superar as condições nominais dos equipamentos. Pode-se evitar a troca de equipamentos superados instalando-se dispositivos pirotécnicos, retirando a contribuição desta fonte no momento de falta. A desvantagem é que se retira toda a geração após a interrupção da falta.

Outra aplicação é utilizar o dispositivo pirotécnico em paralelo com o reator limitador, conforme a Figura 2.4 [34]. Neste caso, quando ocorrer a falta o dispositivo introduz a entrada do reator em série com o circuito, reduzindo o valor da corrente de curto para dentro dos valores de corrente nominais de interrupção do disjuntores.

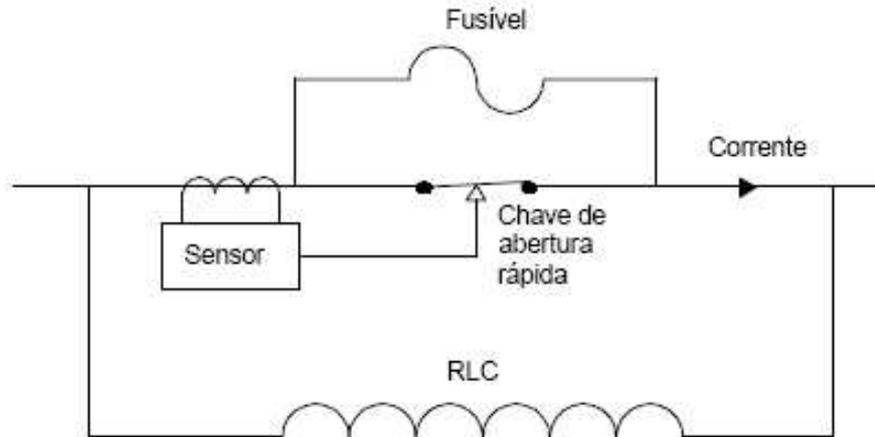


Figura 2.4: Esquema de um limitador de corrente de falta pirotécnico em paralelo com um reator limitador de corrente.

A vantagem desta instalação é que ela evita as perdas no reator e as quedas de tensão em regime normal de operação.

2.3 Dispositivo com Tecnologia FACTS

No final da década 80, surgiu, nos Estados Unidos, o conceito FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) que trata basicamente da aplicação da eletrônica de potência em sistemas de potência, visando um controle rápido e eficiente do fluxo de potência ativo e reativo. Este controle de fluxo de potência pode ser obtido pelo uso de circuito eletrônico que controla rapidamente o ângulo de carga, a impedância ou a tensão do sistema CA, tornando o sistema de transmissão mais flexível e conseqüentemente com resposta mais rápida. Esses dispositivos também podem ser usados para amortecimento de oscilações eletromecânicas, aumento da capacidade de transmissão e limitação de corrente de curto.

Os dispositivos FACTS são divididos em três categorias: [27]

- dispositivos FACTS shunt (derivação);
- dispositivos FACTS série;
- dispositivos FACTS série e shunt simultaneamente;

Dentre estas divisões são citados alguns destes dispositivos:

- Compensadores estáticos, SVC (*Static Var Compensator*);
- Reator controlado por tiristor, TCR (*Thyristor Controlled Reactor*);
- Capacitor chaveado por tiristor, TSC (*Thyristor Switched Capacitor*);
- Capacitor série chaveado por tiristor, TSSC (*Thyristor Series Switched Capacitor*);
- Capacitor série controlado por tiristor, TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*);
- Transformador defasador, PST (*Phase Shift Transformer*);

2.3.1 Capacitor série controlado por tiristor - TCSC

Pode-se falar que entre todos os dispositivos FACTS citados aqui nesta seção, o mais promissor para limitação de corrente de curto-circuito é o TCSC que já vem sendo usado para controle de fluxo de potência, amortecimento de potência e pode ser usado como limitador de corrente de curto-circuito [36].

O TCSC não é usado somente como limitador de corrente, devido ao seu alto custo, então este dispositivo deve agregar outros benefícios, para ser viável.

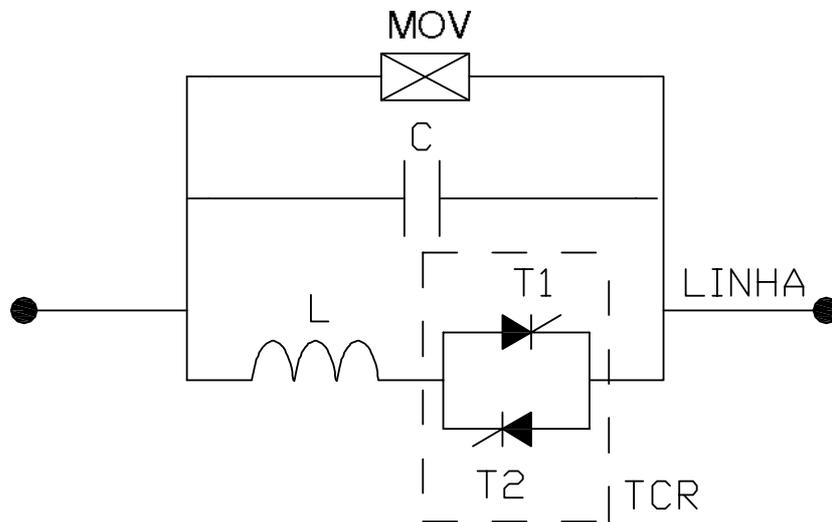


Figura 2.5: Esquema de um dispositivo TCSC.

A figura 2.5 apresenta o esquema básico do TCSC, que é composto por um banco de capacitores série, em paralelo com um reator controlado por tiristores. Além disso, é usado um para-raio, MOV-*Metal Oxide Varistor*, para proteção do capacitor. Através do capacitor série e o reator controlado por tiristores realiza-se rapidamente o controle contínuo da impedância

desse dispositivo, podendo ser usado para limitar a corrente de curto-circuito. Para o TCSC ser usado como limitador ele deverá apresentar uma alta impedância indutiva.

No Brasil, quatro TCSC são utilizados para o amortecimento de oscilações de potência nas interligações Norte-Sul I e II, instalados nas Subestações de Imperatriz e Serra da Mesa 500 kV.

2.3.2 Dispositivo Limitador de Corrente combinando um TPSC e um reator

Esse dispositivo é baseado na tecnologia FACTS, combinando um TPSC, *Thyristor Protected Serie Compensations*, com um reator externo série como mostra a figura 2.6 [21].

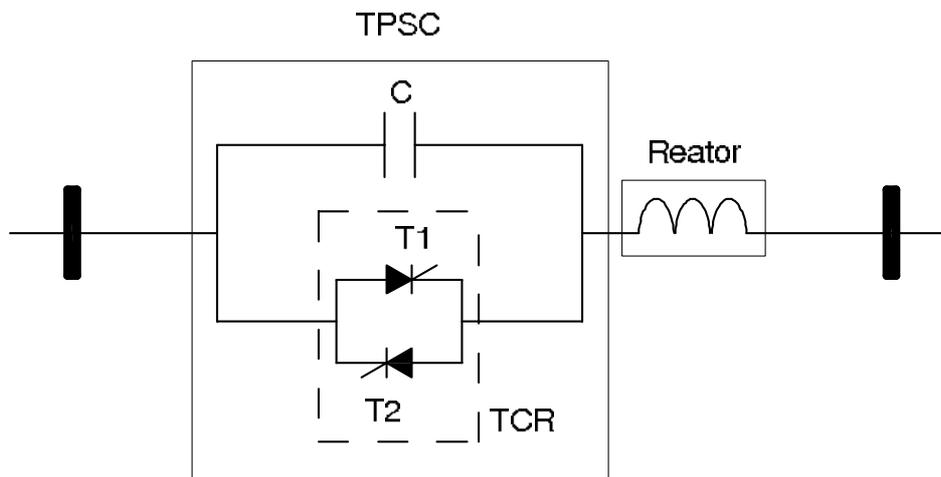


Figura 2.6: Esquema de um dispositivo limitador baseado no TPSC.

Em regime permanente, este dispositivo opera com uma impedância nula, circuito LC ressonante. Quando ocorre um defeito, o capacitor é retirado do circuito através da chave semicondutora, aumentando a impedância equivalente do circuito.

2.4 Disjuntores Eletrônicos de Abertura Rápida

Os disjuntores convencionais, através de novos meios de extinção, possuem tempo de abertura de 1,5 ciclos, sendo considerados lentos comparados com as chaves semicondutoras de eletrônica de potência.

Os disjuntores, contendo chaves eletrônicas, atuam no máximo em 0,5 ciclo [27], aumentando a velocidade de atuação destes disjuntores eletrônicos. Porém, as chaves de estado sólido provocam perdas em regime permanente maiores que as dos disjuntores convencionais.

A utilização dos disjuntores rápidos, como limitadores, é realizada, fazendo com que os disjuntores eletrônicos atuem bem antes que os disjuntores convencionais superados. Os disjuntores rápidos atuam, seccionando o barramento ou abrindo a linha, reduzindo o nível de curto-circuito total, permitindo a operação normal dos disjuntores convencionais.

2.5 Controlador de Potência Interfases

A tecnologia IPC, Controlador de Potência Interfases, foi desenvolvida pela Asea Brown Boveri - ABB e Hydro Quebeq - CITEQ. O IPC utiliza equipamentos convencionais, como capacitores, indutores, transformadores defasadores, e alguns até módulos de eletrônica de potência.

Os IPCs são conectados entre duas barras e possuem, no mínimo, dois ramos paralelos, no qual um é capacitivo e o outro indutivo, como pode ser visto na figura 2.7 [5].

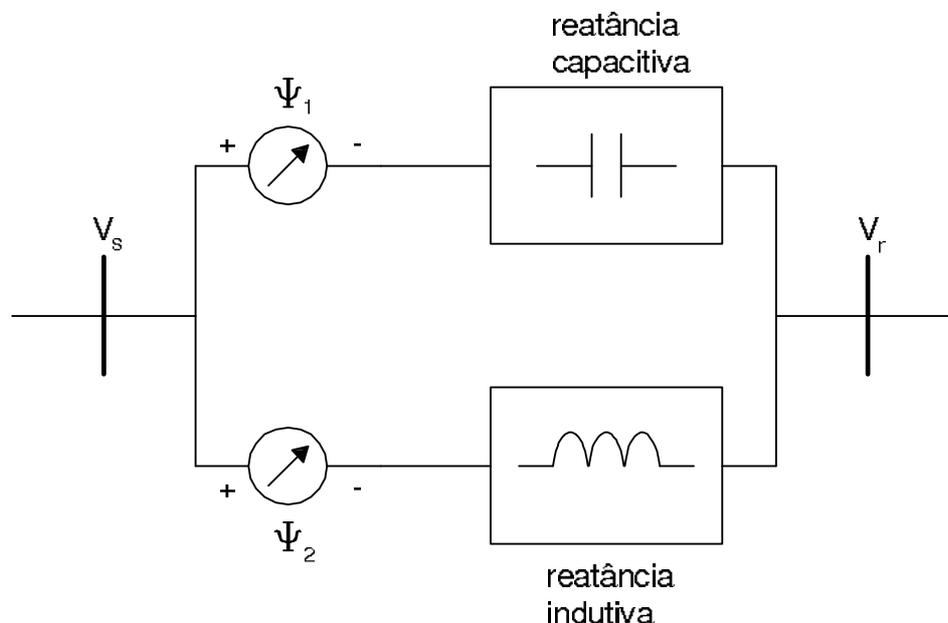


Figura 2.7: Circuito equivalente do IPC com 2 ramos.

Além disso, um elemento defasador pode estar em série com a reatância nesses ramos. Este elemento defasador pode ser:

- transformador defasador;
- conexões de transformadores convencionais;
- conexões entre fases diferentes de dois sistemas síncronos.

As principais aplicações do IPC são:

- interligações de redes assíncronas;
- interligações de subsistemas síncronos;
- aumento da capacidade de transformação sem elevar os níveis de correntes de curto-circuito;
- controle do fluxo de potência em linhas de transmissão.

Para cada uma dessas aplicações, existe um tipo específico de IPC. Os IPCs também são subdivididos em IPCs síncronos e IPCs assíncronos. Os IPCs síncronos são aplicados em redes síncronas e os IPCs assíncronos são aplicados em redes assíncronas.

Os IPCs síncronos podem ser designados pelos seguintes termos:

- **Interligador de Desacoplamento (ID):**
usados para desacoplar redes em interligações, evitando os problemas de oscilação, de flutuações excessivas de tensões e de elevação dos níveis de curto-circuito.
- **Transformador Limitador de Corrente de Curto-Circuito (TLCC):**
usados para desacoplar redes quando existir outros transformadores convencionais em paralelo, permitindo o aumento da capacidade de transformação sem elevar os níveis de curto-circuito nas redes envolvidas.
- **Transformador Defasador Assistido (TDA):**
estes dispositivos podem ser usados para aumentar a capacidade de transferência dos transformadores defasadores (PST) existentes ou para implementar um equivalente PST de maior capacidade por um custo mais baixo.

2.6 Limitador de Corrente de Falta Supercondutor

Após 1986, com o surgimento dos supercondutores de alta temperatura (HTS), a aplicação da supercondutividade nos sistemas de potência, incluindo geradores, motores, transformadores, cabos, sistemas de armazenamento de energia e limitadores de corrente de falta, teve um grande progresso [6, 32].

Uma das aplicações mais promissoras dos HTSs é o limitador de corrente de falta. Estes dispositivos apresentam características que em conjunto não podem ser fornecidos por dispositivos convencionais, a saber:

- influência desprezível durante operação normal;
- redução efetiva das correntes de curto-circuito, bem antes do primeiro pico de corrente;
- capacidade de auto-restauração.

O primeiro Dispositivo Limitador de Corrente de Falta Supercondutor, DLCFS, foi instalado na Suíça em 1996, numa indústria alimentada em 10,5 kV com uma potência instalada de 1,2 MVA [7].

A Siemens também desenvolveu um limitador de 100 kVA, refrigerado a nitrogênio líquido, feito de filmes finos de material supercondutor de alta temperatura [22].

Desde então, vários protótipos de DLCFS já vêm sendo estudados como uma nova tecnologia para limitar correntes de curto-circuito [7, 8].

Até agora existem várias arquiteturas diferentes de DLCS, mas basicamente existem quatro opções que serão apresentados neste item.

2.6.1 Limitador de corrente de falta supercondutor do tipo resistivo

O DLCFS resistivos normalmente trabalham resfriados com nitrogênio líquido, ou seja numa temperatura de 77K, e são montados em série com o sistema.

A cerâmica supercondutora é localizada no interior de um reservatório com isolamento térmico. Neste reservatório se localiza o nitrogênio líquido, no qual a cerâmica se encontra imersa mantendo sua temperatura de trabalho, como pode ser visto na figura 2.8.

O limitador é conectado diretamente no percurso da corrente de falta, e as correntes normais e de falta circulam pelo supercondutor, como é mostrado na figura 2.9. Quando a

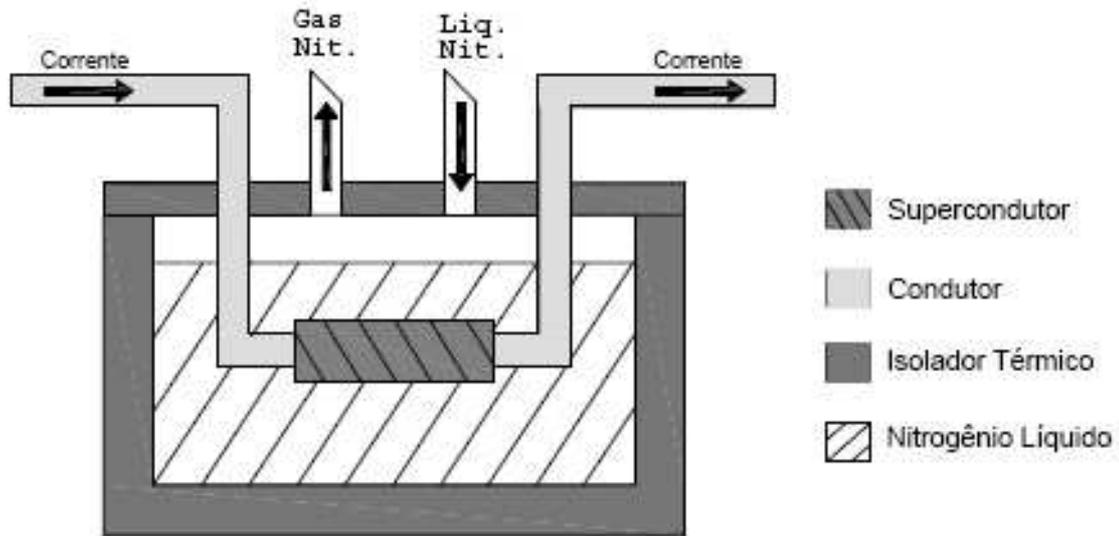


Figura 2.8: Limitador de corrente de falta supercondutor do tipo resistivo (DLCFS).

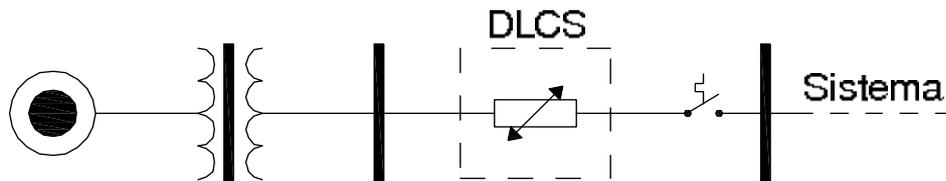


Figura 2.9: Circuito elétrico equivalente de DLCFS do tipo resistivo.

corrente excede um certo limite, o supercondutor perde sua capacidade de supercondução muito rápido, passando ao estado condutor normal. Ao estado condutor normal corresponde um aumento da resistência, limitando efetivamente a corrente de falta.

Uma vez que um supercondutor retorna ao estado condutor normal, ele aquece muito rápido, devido à dissipação por efeito Joule. Para evitar esse aquecimento, um disjuntor abre o circuito em alguns ciclos após a ocorrência da falta. Então, os elementos limitadores resfriam-se automaticamente até sua temperatura normal de operação, e o estado de supercondutividade é recuperado.

2.6.2 Limitador de corrente de falta supercondutor do tipo indutivo

O dispositivo limitador de corrente supercondutor do tipo indutivo é um transformador em que a cerâmica supercondutora blinda o campo magnético do enrolamento de cobre

primário em operação normal.

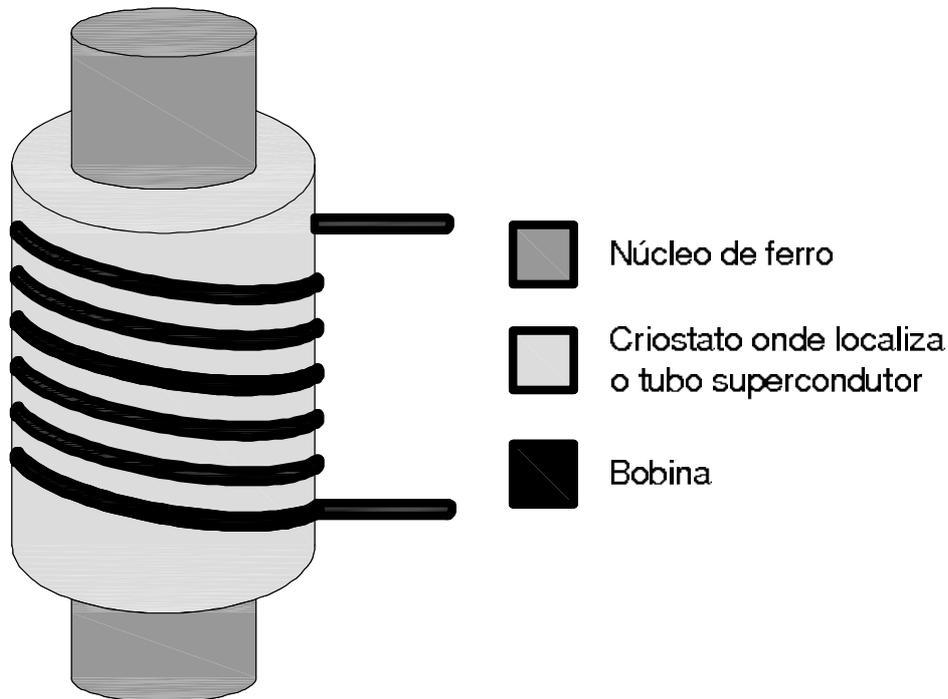


Figura 2.10: Esquemático de um DLCFS tipo indutivo.

A bobina primária consiste de vários enrolamentos análogos aos de uma bobina convencional. O secundário, na maioria das vezes, é um tubo de cerâmica supercondutora protegido por um criostato localizado no interior da bobina primária. No centro da estrutura encontra-se um núcleo de ferro, como é mostrado na figura 2.10.

A bobina primária é instalada em série com a rede e durante a operação normal, o campo magnético produzido por essa bobina é blindado completamente pelo tubo supercondutor no interior da bobina primária, efeito Meissner. Quando a corrente aumenta acima de um certo nível, o campo magnético crítico do tubo supercondutor é ultrapassado e penetra no núcleo de ferro, aumentando a impedância do DLCFS tipo indutivo, limitando a corrente de falta.

O DLCFS tipo indutivo requer a interrupção da corrente, seguindo à ação de limitação e requer também um período de recuperação.

2.6.3 Limitador de corrente de falta supercondutor do tipo ponte

O DLCFS do tipo ponte [31] utiliza diodos em forma de ponte, D1 a D4, que são conectados a um enrolamento supercondutor, L, que apresentará uma indutância limitante, como

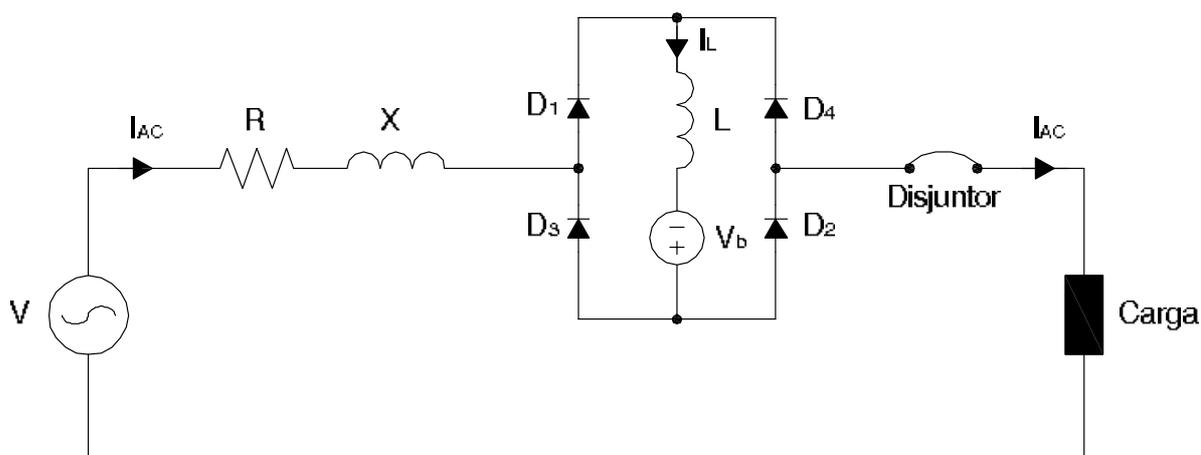


Figura 2.11: Circuito elétrico equivalente de DLCFS do tipo ponte.

pode ser visto na figura 2.11. Em condições normais de operação, haverá corrente pelos quatro diodos. A corrente no enrolamento permanecerá quase constante e seu valor máximo é igual à corrente de pico da carga. É adicionada uma fonte CC para elevar o nível de corrente no indutor, mantendo os diodos sempre em condução. Como a corrente no indutor é praticamente constante, ele se torna invisível ao sistema em regime permanente.

No caso de uma condição de falta eventual, a corrente aumenta com uma constante de tempo igual a L/R , no qual R é a soma das resistências da fonte, dos diodos e do próprio indutor. Com um pequeno valor de R , a constante de tempo L/R assume valores da ordem de alguns segundos. Assim, o disjuntor interrompe a corrente, e a corrente interrompida fica semelhante à corrente de carga.

2.6.4 Limitador de corrente de falta supercondutor do tipo fluxo fechado

O DLCFS tipo fluxo fechado pode ser classificado como uma mistura dos DLCFS tipo resistivo e indutivo. Entretanto, o DLCFS tipo fluxo fechado tem diferentes características operacionais e estruturais em relação ao DLCFS tipo resistivo e indutivo [24, 25, 37].

O DLCFS tipo fluxo fechado possui dois enrolamentos acoplados, conhecidos como primário e secundário. O enrolamento secundário está ligado em série com o elemento supercondutor HTS e estes estão ligados em paralelo com o enrolamento primário, como pode ser visto na figura 2.12.

Durante operação normal do sistema, o fluxo gerado pelo enrolamento primário é cancelado pelo enrolamento secundário, porque a resistência do HTS é zero. Quando ocorrer uma condição eventual de falta, a corrente do enrolamento secundário excede a corrente crítica

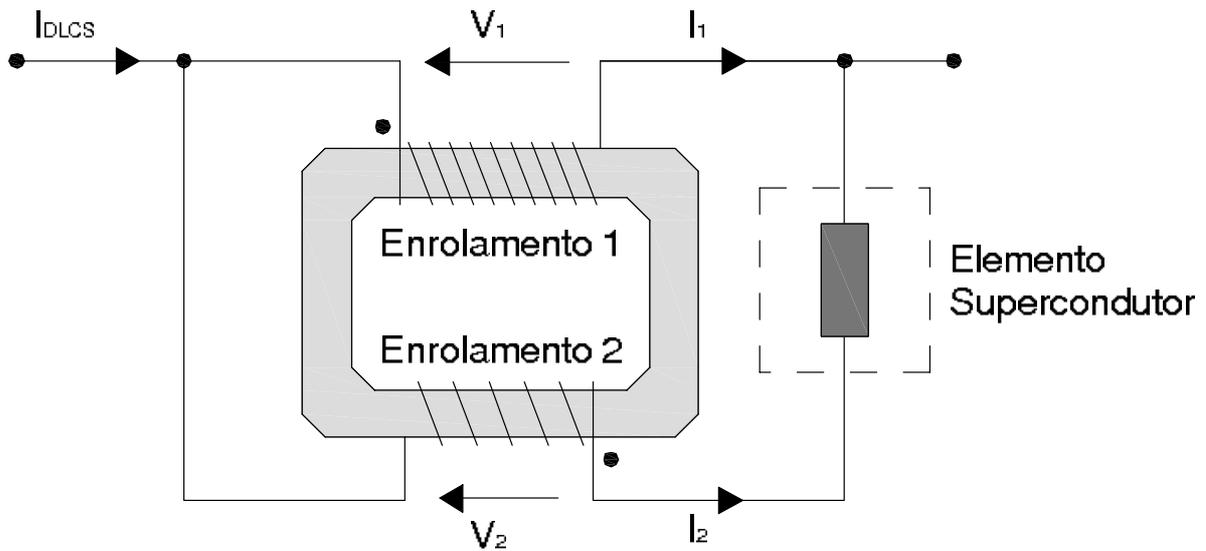


Figura 2.12: DLCFS do tipo fluxo fechado.

do HTS, aparecendo uma resistência no HTS, permitindo o acoplamento do fluxo dentro do núcleo de ferro, dando origem à impedância do DLCFS, limitando assim, a corrente de falta.

Circuito equivalente do DLCFS do tipo fluxo fechado

O circuito equivalente do DLCFS tipo fluxo fechado é mostrado na figura 2.13, na qual:

- R_1 e R_2 representam as resistências de cada enrolamento;
- L_1 e L_2 representam as indutâncias de dispersão de cada enrolamento;
- N_1 e N_2 representam o número de espiras de cada enrolamento;
- L_m e R_c representam a indutância de magnetização e a resistência de perdas do núcleo.

$$i_{DLCS} = i_E + i'_1 + i_2 \quad (2.1)$$

$$i'_1 = -\frac{N_2}{N_1} \times i_2 \quad (2.2)$$

$$v_{sc} = v_1 - v_2 \quad (2.3)$$

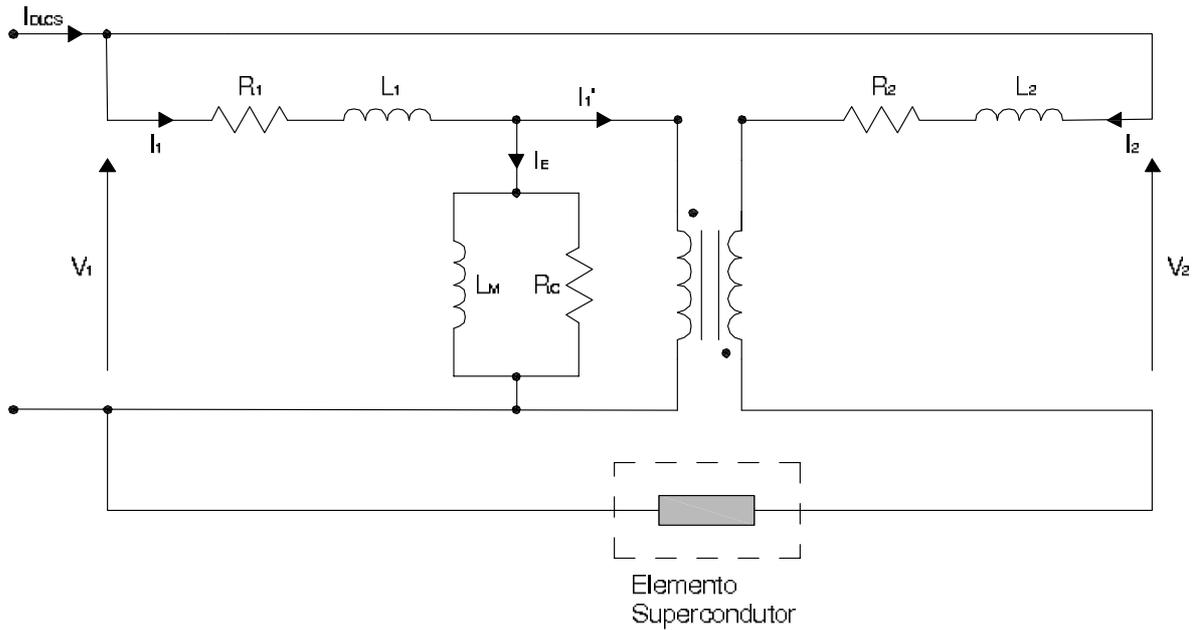


Figura 2.13: Circuito elétrico equivalente de DLCFS do tipo fluxo fechado.

Com boa aproximação tem-se:

$$v_2 = \frac{N_2}{N_1} \times v_1 \quad (2.4)$$

Substituindo a equação 2.2 na equação 2.1, obtém-se:

$$i_{DLCFS} = i_E + \frac{N_1 - N_2}{N_1} \times i_2 \quad (2.5)$$

Levando a equação 2.4 na equação 2.3, chega-se a:

$$v_{sc} = \frac{N_1 - N_2}{N_1} \times v_1 \quad (2.6)$$

$$R_{sc} = \frac{v_{sc}}{i_2} \quad (2.7)$$

sendo R_{sc} a resistência apresentada pelo elemento supercondutor, no estado condutor normal.

Substituindo as equações 2.5 e 2.6 na equação 2.7, tem-se:

$$R_{sc} = \left[\frac{N_1 - N_2}{N_1} \right]^2 \times \frac{v_1}{i_{DLCFS} - i_E} \quad (2.8)$$

Como $i_E \ll i_{DLCFS}$, então a equação 2.8 pode ser resumida:

$$R_{sc} \simeq \left[\frac{N_1 - N_2}{N_1} \right]^2 \times \frac{v_1}{i_{DLCFS}} \quad (2.9)$$

Considerando Z_{DLCFS} a resistência apresentada pelo DLCFS, vista pelo primário:

$$Z_{DLCFS} = \frac{v_1}{i_{DLCFS}} \quad (2.10)$$

e, substituindo a equação 2.10 na equação 2.9, chega-se a:

$$Z_{DLCFS} \simeq \left[\frac{N_1}{N_1 - N_2} \right]^2 \times R_{sc} \quad (2.11)$$

Pode-se observar que para este limitador de corrente, a impedância do DLCFS é aumentada numa razão aproximada de $\left[\frac{N_1}{N_1 - N_2} \right]^2$ da resistência apresentada pelo elemento supercondutor.

2.7 Vantagens

No início é improvável que a instalação de um DLCFS seja mais barato que de um disjuntor convencional. Porém, os custos mais altos de um DLCFS são compensados por suas vantagens no sistema elétrico:

- menor solicitação térmica, mecânica e eletrodinâmica dos equipamentos e sistemas;
- aumento da confiabilidade de fornecimento, graças aos barramentos associados;
- aumento da flexibilidade na operação e projetos de redes;
- melhor utilização da capacidade instalada, graças ao compartilhamento dos transformadores;
- menos necessidade de sobressalentes;
- nenhum aumento na capacidade de curto-circuito e, portanto, nenhuma necessidade ou adiamento de investimento em equipamento novo;
- crescimento harmonizado ou absorção de produtores independentes de energia, sem ter que atualizar instalações existentes;

- alta qualidade de fornecimento de energia, além de correntes de falta menores.

O uso de dispositivos limitadores de corrente de falta supercondutores torna possível operar sistemas com baixa impedância garantindo níveis de corrente de falta baixos.

2.8 Conclusões

Os supercondutores têm grande potencial de aplicação em sistemas de alimentação em geral (geração, transmissão, distribuição, sistemas industriais, comerciais) como limitadores de corrente de falta. Neste aspecto apresenta a característica de resposta imediata, fato que associado a outros dispositivos de proteção, em especial disjuntores, confere ao sistema o desempenho ótimo previsto por norma [1]. Das diversas topologias já conhecidas com HTS, a da aplicação mais trivial parece ser o limitador do tipo resistivo, e este será o desenvolvido com o supercondutor que se trabalha no Laboratório de Supercondutividade Aplicada (SUPERA). Para melhor compreensão do assunto, no Capítulo 3 apresenta-se uma visão geral da supercondutividade.

Capítulo 3

Supercondutividade

3.1 Descoberta da Supercondutividade e Evolução Histórica

O físico holandês Kamerlingh Onnes achava que as vibrações do átomo do metal, dificultavam o deslocamento dos elétrons e causavam a resistência. Essas vibrações deveriam cessar no zero absoluto de temperatura, nesse caso a resistência cairia a zero gradualmente. Já Lord Kelvin previa que os próprios elétrons deveriam entrar em repouso no zero absoluto. Assim, a resistência elétrica na temperatura zero seria infinita [2].

Para se determinar qual era o comportamento verdadeiro era necessário medir a resistência dos metais a baixíssima temperatura. Isso só foi possível após 1908, na universidade holandesa de Leiden, quando o professor Kamerlingh Onnes conseguiu liquefazer o hélio, atingindo uma temperatura de cerca de 1K, por bombeamento de vapor. Assim tornou-se possível estudar o comportamento dos materiais a temperaturas muito baixas.

Em 1911, ao pesquisar o comportamento da resistividade de metais para temperaturas baixas, Kamerlingh Onnes verificou que a resistividade do mercúrio caía repentinamente a zero quando a temperatura do mercúrio era inferior a uma temperatura crítica T_C aproximadamente igual a $4,2\text{K} = -268,8^\circ\text{C}$. Não foi caindo gradualmente, como esperava Onnes, nem foi para o infinito como Kelvin afirmava. Esse resultado foi apresentado por Onnes em um artigo publicado em uma revista científica holandesa em maio de 1911, com o título "Sobre a variação da resistência elétrica de metais puros em temperaturas muito baixas. O desaparecimento da resistência do Mercúrio".

A descoberta da supercondutividade do mercúrio, realizada por Kamerlingh Onnes em 1911, era chamada por ele "estado de resistividade zero" e foi seguida por outras descobertas espetaculares feitas no Laboratório da Universidade de Leiden. Em 1913, verificou-se que o

chumbo se tornava supercondutor abaixo de uma temperatura crítica aproximadamente igual a $7,2K = -265,8^{\circ}C$. Nesse mesmo ano Onnes recebe o Prêmio Nobel de Física. Em 1914, Kamerlingh Onnes notou que a supercondutividade podia ser destruída por um campo magnético H maior do que um certo campo magnético crítico H_C . Em virtude disto, verificou-se também que existia uma certa densidade de corrente crítica J_C , acima da qual o material passa da fase supercondutora para a fase normal. Portanto, já em 1914 sabia-se que a supercondutividade é destruída quando é superado qualquer um dos chamados parâmetros críticos: a temperatura crítica T_C , o campo crítico H_C e a densidade de corrente crítica J_C .

A fabricação de um forte eletroímã supercondutor foi uma das primeiras aplicações da supercondutividade imaginadas por Kamerlingh Onnes. Contudo, como os valores de H_C e de J_C medidos por Kamerlingh Onnes eram relativamente pequenos, o primeiro eletroímã supercondutor forte só foi construído por volta de 1930 com a descoberta dos chamados supercondutores do tipo II, que apresentam corrente crítica e temperatura crítica superiores às dos supercondutores do tipo I.

Os supercondutores do tipo I devem ser refrigerados a hélio, devido às baixas temperaturas envolvidas. O supercondutor do tipo I com temperatura crítica mais elevada conhecido até 1930 era o nióbio, $T_C = 9,2K = -263,8^{\circ}C$. Em 1954, verificou-se que a liga metálica Nb_3Sn é um supercondutor do tipo II com uma temperatura crítica $T_C = 18,1K = -254,9^{\circ}C$. Em 1971, descobriu-se que a liga metálica Nb_3Ga se tornava um supercondutor do tipo II, com $T_C = 20,3K = -252,7^{\circ}C$. Em 1973, foi descoberto que a liga metálica Nb_3Ge se tornava um supercondutor do tipo II com $T_C = 23,9K = -249,1^{\circ}C$. Portanto, somente na década de 1970 é que se descobriram os supercondutores refrigerados com hidrogênio, que possui temperatura de liquefação aproximadamente igual a $20,3K = -252,7^{\circ}C$ para $1atm$ de pressão.

Devido ao crescente aumento de possíveis aplicações da supercondutividade, os pesquisadores do mundo inteiro passaram a buscar um supercondutor que possuísse uma temperatura crítica da ordem da temperatura ambiente.

O valor de T_C igual a $23,9K = -249,1^{\circ}C$, para o Nb_3Ge , permaneceu como recorde desde 1973 até 1986, quando Bednorz e Müller descobriram que a cerâmica $LaBaCuO$ se tornava supercondutora com uma temperatura crítica da ordem de $30K = -243^{\circ}C$ a $40K = -233^{\circ}C$. Com este evento iniciou-se uma série de outras descobertas de supercondutores que podiam ser refrigerados com o neônio líquido, cuja temperatura de liquefação, para $1atm$, é aproximadamente igual a $27,2K = -245,8^{\circ}C$. Em 1987, Bednorz e Müller receberam o Prêmio Nobel de Física por esta descoberta.

O passo seguinte foi a descoberta de supercondutores que podem ser refrigerados com o nitrogênio líquido, cuja temperatura de liquefação, para $1atm$, é igual a $77,4K = -195,6^{\circ}C$.

Estes supercondutores, considerados de alta temperatura crítica, são do tipo YBaCuO. Por exemplo, em 1987, verificou-se que a cerâmica $(Y_{0,6}Ba_{0,4})_2CuO_{4-y}$, era um supercondutor e possuía temperatura crítica $T_C = 93K = -180^\circ C$.

A partir de 1987 descobriram-se muitos outros supercondutores cerâmicos. As temperaturas críticas mais elevadas, observadas até 2005, são da ordem de $130K = -143^\circ C$ a $140K = -133^\circ C$. Em princípio, não existe nenhum impedimento teórico para que as temperaturas críticas atinjam valores da ordem da temperatura ambiente. Se este objetivo for atingido, certamente surgirá uma nova revolução tecnológica muito mais profunda do que a revolução eletrônica iniciada na década de 50 com a fabricação das junções p-n e dos transistores.

No estágio atual das pesquisas sobre supercondutividade, a refrigeração com o nitrogênio líquido é mais vantajosa do que a refrigeração com o hélio líquido. De acordo com Ginzburg [18], os custos do uso e da manutenção de uma linha de refrigeração com nitrogênio líquido pode se tornar 100 vezes menor do que os custos do uso e da manutenção de uma linha de refrigeração com o hélio líquido.

Logo depois da descoberta da supercondutividade em 1911, não existia nenhuma explicação teórica sobre o fenômeno da supercondutividade. Acreditava-se que um supercondutor fosse apenas um condutor ideal com resistência nula. Em 1933, W. Meissner e R. Ochsenfeld descobriram que não existe indução magnética (B) no interior de uma parte maciça de um supercondutor. Este fenômeno de expulsão do fluxo magnético do interior da parte maciça de um supercondutor passou a ser conhecido como Efeito Meissner. Esse fenômeno difere o Estado Supercondutor do Condutor Ideal. A Supercondutividade passa então a ser conhecida como um novo estado da matéria.

Em 1935, London [26] elaborou uma teoria macroscópica que explica qualitativamente não só o Efeito Meissner como também outras propriedades eletromagnéticas dos supercondutores. Em 1950 esta teoria foi ampliada e refinada por Ginzburg e Landau [3].

Em 1957 Bardeen, Cooper e Schieffer [4] formularam a mais importante teoria microscópica que permite explicar praticamente todos os efeitos associados com a supercondutividade. Esta formulação teórica passou a ser conhecida na literatura como a teoria BCS (iniciais dos autores). Os autores da teoria BCS foram laureados em 1972 com o Prêmio Nobel de Física. Em homenagem a Cooper, os dois elétrons ligados que participam do fenômeno coletivo da supercondutividade receberam o nome de pares de Cooper.

Em 1962, Josephson [23] fez a previsão teórica do tunelamento dos pares de Cooper através de uma barreira de potencial formada por um isolante situado entre dois supercondutores. Este fenômeno passou a ser conhecido pelo nome de efeito Josephson. Por esta

contribuição ele recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1973.

3.2 Propriedades Magnéticas

3.2.1 Destruição da supercondutividade por meio de campo magnético

Uma variável que determina o comportamento da fase supercondutora é o campo magnético. A supercondutividade é destruída pela aplicação de um campo magnético suficientemente elevado. A intensidade deste campo, acima do qual a supercondutividade é destruída, é denominada de campo crítico, H_C . O valor do campo crítico depende da Temperatura do material, com comportamento apresentado na figura 3.1.

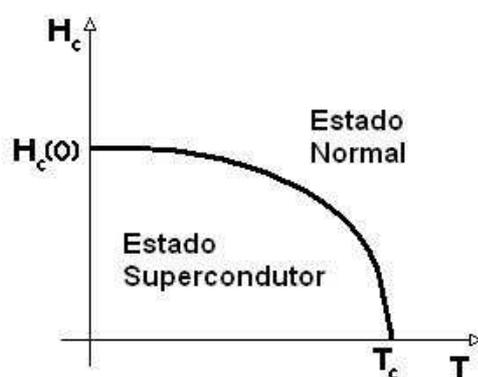


Figura 3.1: Diagrama de fase de um supercondutor.

A curva, que representa o limiar deste fenômeno, separa o estado supercondutor na parte inferior da curva, do estado normal no lado superior. Com essa curva pode-se observar que quanto maior a temperatura, menor o valor do campo necessário para destruir a supercondutividade.

Para o supercondutor do tipo I, a corrente crítica é simplesmente consequência do campo magnético crítico H_C . Como as intensidades de campo crítico são pequenas nos supercondutores do tipo I, as densidades de corrente J_C também são baixas.

Nos supercondutores do tipo II, a relação é mais complicada, essa relação é mostrada na figura 3.2. Nesses supercondutores, a corrente crítica não é mais uma simples consequência do campo magnético, ela se torna um parâmetro crítico da supercondutividade.

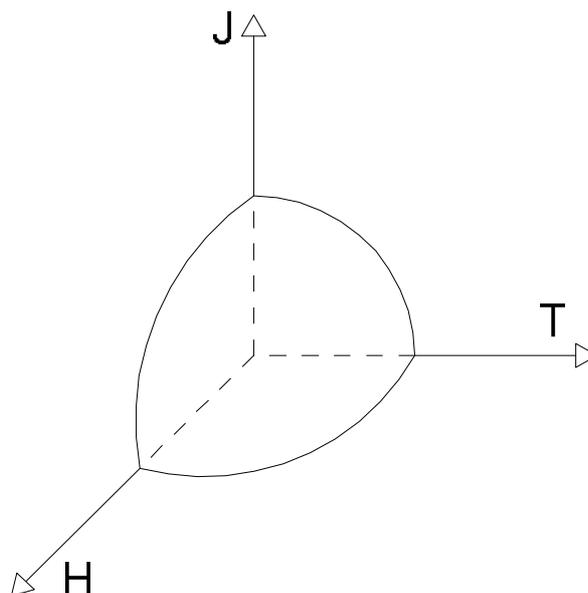


Figura 3.2: Diagrama típico da relação entre Temperatura - Campo Magnético - Densidade de Corrente.

3.2.2 Efeito Meissner

Os físicos alemães W. Meissner e R. Ochsenfeld constataram que os supercondutores são diamagnetos quase perfeitos. Quando um material é submetido a um campo magnético, este penetra no mesmo, ainda que o valor em seu interior seja diferente do valor do campo aplicado. Nos supercondutores, em campos suficientemente pequenos, o valor do campo magnético em seu interior é zero; os supercondutores repelem o campo magnético, fenômeno conhecido pelo nome de efeito Meissner, em homenagem a um de seus descobridores. Tal descoberta desorientou os pesquisadores, mas levou a duas conclusões importantes. Em primeiro lugar, ficou demonstrado que um supercondutor não é simplesmente um metal com resistividade zero, pois a resistividade nula não implica diamagnetismo perfeito, logo a supercondutividade deveria ser reconhecida como um novo estado da matéria, com propriedades muito particulares. Em segundo lugar, o efeito Meissner permitiu estabelecer que a transição do estado normal para o supercondutor é uma transição termodinâmica reversível.

Para se entender porque supercondutores são diamagnéticos perfeitos é preciso comparar seu comportamento com o condutor ideal ou perfeito.

Propriedades magnéticas de um condutor perfeito

Seja um material condutor ideal a baixa temperatura que não apresenta resistividade na ausência de um campo magnético aplicado. Quando um campo variável no tempo é aplicado, de acordo com a lei de Faraday-Lenz, uma corrente elétrica é induzida, opondo-se a esta variação. Esta corrente induzida, conhecida como corrente de blindagem, circulará na superfície do material de tal maneira a criar um campo magnético dentro do material que seja exatamente igual e oposto ao campo magnético aplicado. Como essas correntes são persistentes, pois não há resistividade, o fluxo total dentro da amostra permanece nulo.

Considere-se agora, a seguinte seqüência de eventos mostrado na figura 3.3 à esquerda:

1. Um condutor perfeito encontra-se a temperatura ambiente em campo nulo: (A)
2. Resfria-se o condutor até que ele atinja uma resistividade desprezível: (B)
3. A seguir, em baixa temperatura, na qual a resistividade é desprezível, aplica-se um campo magnético: (C)
4. Finalmente, o campo é retirado: (D)

Ao final do processo, o material não fica magnetizado. Para compensar a nova variação de fluxo, desaparecem as correntes de blindagem e o campo magnético interno é nulo.

Agora, considere-se uma outra seqüência de eventos, também mostrada na figura 3.3 à direita:

1. Um campo magnético é aplicado ao material enquanto ele está à temperatura ambiente: (E)
2. O material é agora resfriado a uma temperatura muito baixa na qual sua resistividade elétrica vai a zero. Este desaparecimento da resistividade não tem efeito sobre a magnetização e a distribuição de fluxo permanece inalterada: (F)
3. Reduz-se, o campo magnético a zero. Conforme a lei de Faraday, correntes persistentes são induzidas no material, mantendo o fluxo no seu interior, resultando em uma magnetização permanente do material: (G)

Observa-se que o estado de magnetização de um condutor perfeito não está unicamente determinado pelas condições externas mas depende da seqüência com que estas condições foram obtidas.

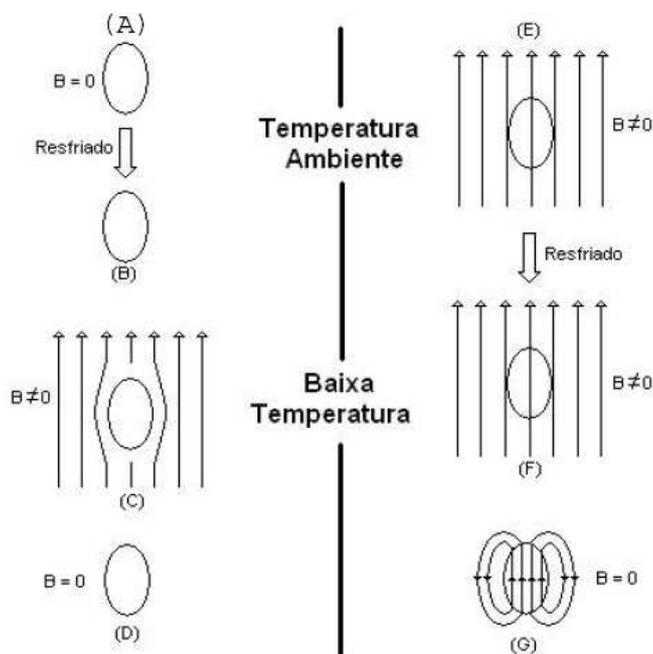


Figura 3.3: Comportamento magnético de um condutor perfeito.

Comportamento magnético especial de um supercondutor

Até 22 anos após a descoberta da supercondutividade, acreditava-se que o efeito de um campo magnético sobre um supercondutor seria como o de um condutor perfeito. Entretanto, em 1933, Meissner e Ochsenfeld submeteram amostras de estanho e chumbo ao processo de resfriamento na presença de campo magnético, como mostra a figura 3.4 (E), (F) e (G). Ao contrário do que ocorre com o condutor perfeito, observaram que o fluxo total dentro das amostras cancelava-se, isto é, elas espontaneamente transformavam-se em diamagnetos perfeitos, independente da seqüência com que estas condições foram obtidas.

Este experimento demonstrou que os supercondutores têm uma propriedade adicional em relação aos condutores perfeitos: além de possuírem resistividade nula, os materiais supercondutores expulsam as linhas de fluxo do seu interior.

Dentro do material no estado supercondutor tem-se sempre, $B = 0$. Este efeito, no qual um supercondutor em presença de campo magnético expulsa de seu interior as linhas de fluxo, é chamada efeito Meissner.

Ao contrário do condutor perfeito, o estado final do supercondutor depende somente dos valores de campo aplicado e temperatura e não da seqüência na qual estes valores foram obtidos.

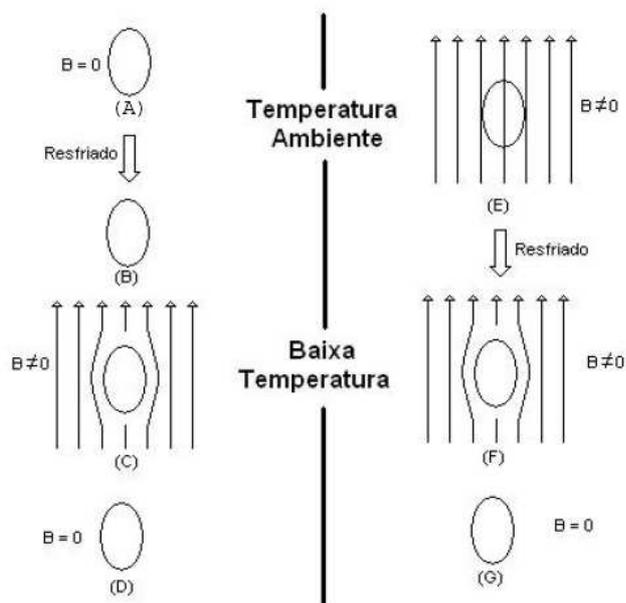


Figura 3.4: Comportamento magnético de um supercondutor.

Como observado, o supercondutor, abaixo da sua temperatura de transição e sujeito a um campo magnético H , não possui indução. Então, se

$$B = H + 4.\pi.M \quad (3.1)$$

Sendo M a magnetização do material e $B = 0$, tem-se

$$H = -4.\pi.M \quad (3.2)$$

A curva de magnetização obtida nas condições da experiência de Meissner-Ochsenfeld é esboçada nas figuras 3.5(a) e 3.5(b).

Muitos materiais puros exibem o comportamento da figura 3.5(a) e são denominados supercondutores do tipo I. Os supercondutores do tipo I possuem geralmente valores de H_C muito baixos.

Outros materiais possuem uma curva de magnetização como a indicada na figura 3.5(b). Esses materiais são conhecidos como supercondutores do tipo II. Eles podem ser ligas ou elementos metálicos de transição com elevados valores da resistividade elétrica no estado normal.

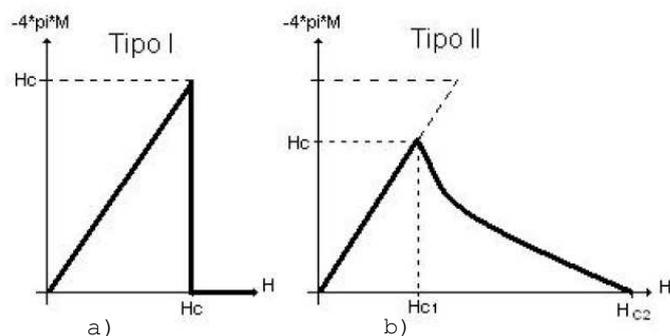


Figura 3.5: Variação da magnetização em função do campo magnético em materiais supercondutores do tipo I(a) e tipo II(b).

Os supercondutores do tipo II possuem propriedades elétricas supercondutoras até um campo designado por H_{C2} . Até um valor $H = H_{C1}$ o fluxo magnético é completamente excluído ($B \neq 0$). A partir de H_{C1} , o fluxo magnético penetra no interior de um supercondutor do tipo II, diz-se que o efeito Meissner é incompleto e esta região é denominada estado vórtice ou estado misto. Para $H > H_{C2}$, o supercondutor do tipo II se transforma em um condutor.

3.2.3 Estado Misto

Quando na presença de um campo magnético aplicado sobre um supercondutor do tipo II, sua penetração no material gera uma corrente circular, lei de Ampère, em torno deste campo ao qual dá-se o nome de vórtice, como mostra a figura 3.6.

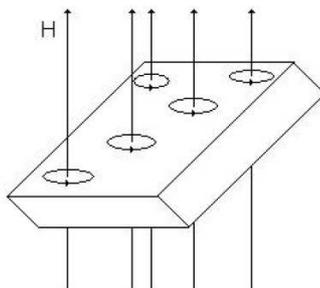


Figura 3.6: Estado misto, mostrando os vórtices de supercondutores.

Os vórtices repelem-se, devido ao aparecimento de uma corrente circulando em torno do campo. Se as forças que aprisionam os vórtices forem mais fracas que as forças de repulsão entre os vórtices, eles se ordenarão de forma triangular formando uma estrutura chamada de

Rede de Abrikosov. Essa formação pode ser também chamada de sólido triangular bidimensional, figura 3.7a.

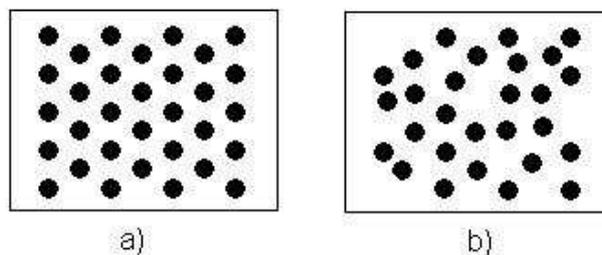


Figura 3.7: Grupo de vórtices vistos por cima. a) Arranjo ordenado triangular, chamado de Rede de Abrikosov, b) arranjo irregular de vórtices.

Quando aumenta a temperatura, os vórtices adquirem energia na forma de calor, passam a vibrar e movem-se sobre as posições de equilíbrio da Rede de Abrikosov, podendo produzir um arranjo irregular, figura 3.7b.

Como as amostras reais não são homogêneas, ou seja, possuem imperfeições, os vórtices ficam aprisionados nestes locais, que são chamado de *center pinning*. Essas imperfeições podem ser impurezas, contorno de grão, lacunas, deslocamentos, etc.

3.2.4 Irreversibilidade magnética

Um supercondutor do tipo II perfeitamente homogêneo na composição, apresenta uma magnetização reversível, como mostra a figura 3.8.

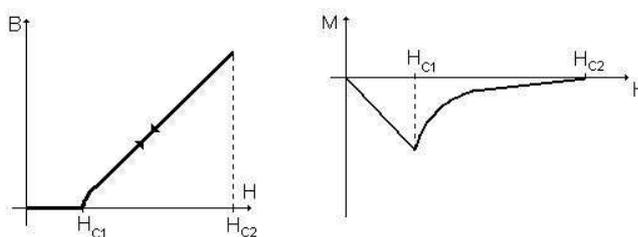


Figura 3.8: Magnetização de supercondutor do tipo II.

Quando H for menor que H_{C1} , o supercondutor do tipo II se comporta exatamente com um supercondutor do tipo I, apresentando-se com um elemento diamagnético perfeito.

As amostras reais usualmente mostram alguma irreversibilidade na caracterização magnética.

A irreversibilidade é atribuída ao fato de que os centros dos vórtices, tornam o supercondutor no estado misto, podendo os vórtices serem aprisionados por imperfeições no material, sendo então preservados da capacidade de mover-se livremente. Consequentemente, aumentando o campo aplicado a partir do zero, não existe entrada repentina do fluxo até H_{C1} , figura 3.9, porque os centros formados na superfície são impedidos pelo movimento interior. Similarmente, reduzindo o campo aplicado a partir do valor H_{C2} , existe uma histerese, e o fluxo pode ser aprisionado na amostra, porque alguns centros de vórtices são presos e não podem escapar.

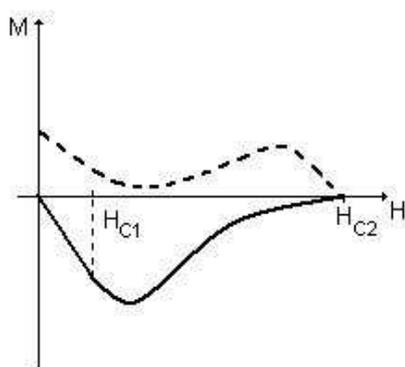


Figura 3.9: Magnetização de supercondutor do tipo II em materiais reais.

O aprisionamento dos vórtices por imperfeições é uma parte muito importante na determinação da corrente crítica dos supercondutores do tipo II.

3.2.5 Profundidade de Penetração

As primeiras idéias que contribuíram para a descrição da supercondutividade surgiram do modelo de dois fluidos proposto por F. London em 1934. Algumas propriedades podem ser entendidas como simples pressupostos de que alguns elétrons, no material, comportam-se de maneira normal, aproximadamente como elétrons livres, enquanto outros exibem comportamento anômalo, chamados de super elétrons. Desenvolvendo essa idéia, London foi capaz de descrever a eletrodinâmica dos supercondutores a partir das Leis de Maxwell e com a solução complementar do efeito Meissner. Partiu do princípio de que teria de modificar as equações usuais da eletrodinâmica a fim de descrever o efeito Meissner, mas as equações de Maxwell permaneceriam válidas. Os elétrons normais continuariam a obedecer à lei de

Ohm, $\vec{J}(\vec{r}) = \sigma \cdot \vec{E}(\vec{r})$ na qual σ é a condutividade elétrica, \vec{J} é o vetor que representa a densidade de corrente, \vec{r} é o vetor que representa o raio de ação de \vec{J} e \vec{E} é o vetor que representa o campo elétrico, mas para os elétrons responsáveis pela supercondutividade, esta lei deveria ser modificada.

Considerando uma quantidade n de elétrons por unidade de volume, há uma fração n_s que se comporta de uma maneira diferente dos elétrons livres e representa os superelétrons. Eles não são espalhados nem por impurezas nem por vibrações da rede, portanto, não contribuem com a resistividade. Eles são acelerados livremente por um campo elétrico. Sua equação de movimento, é dada pela segunda lei de Newton,

$$m_p \cdot \frac{d\vec{v}_s}{dt} = q \cdot \vec{E} \quad (3.3)$$

Observe que m_p é a massa dos portadores de carga supercondutor, v_s é a velocidade média dos portadores de carga supercondutor e q é a carga dos portadores de carga supercondutor.

Sabe-se que a densidade de corrente, \vec{J}_s , para esses portadores especiais pode ser descrita:

$$\vec{J}_s = n_s \cdot q \cdot \vec{v}_s \quad (3.4)$$

Derivando no tempo tem-se:

$$\frac{d\vec{J}_s}{dt} = n_s \cdot q \cdot \frac{d\vec{v}_s}{dt} \quad (3.5)$$

Substituindo a equação 3.3 na equação 3.5, tem se:

$$\frac{d\vec{J}_s}{dt} = \frac{n_s \cdot q^2}{m_p} \cdot \vec{E} \quad (3.6)$$

A equação 3.6 é a 1ª equação de London, ela descreve a propriedade de resistividade nula de um supercondutor; não há campo elétrico no material a menos que haja corrente variável no tempo. Essa expressão foi obtida sem o uso de forças dissipativas. Tomando o rotacional nos dois lados da equação 3.6 tem-se:

$$\frac{d}{dt}(\nabla \times \vec{J}_s) = \frac{n_s \cdot q^2}{m_p} \cdot (\nabla \times \vec{E}) \quad (3.7)$$

Pela Lei de Faraday-Lenz,

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt} \quad (3.8)$$

O campo magnético variável gera corrente. Então substituindo a equação 3.8 na equação 3.7 e com a lei de Ampère $\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{J}$ sendo μ_0 a permeabilidade magnética do vácuo, chega-se a:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{\mu_0} \cdot \nabla \times \nabla \times \vec{B} + \frac{n_S \cdot q^2}{m_p} \cdot \vec{B} \right) = 0 \quad (3.9)$$

Para obtenção do efeito Meissner, chega-se a uma condição complementar que é a 2ª equação de London:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{B} + \frac{\mu_0 \cdot n_S \cdot q^2}{m_p} \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.10)$$

Utilizando a seguinte identidade vetorial:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{B} = -\nabla^2 \vec{B} + \nabla(\nabla \cdot \vec{B}) \quad (3.11)$$

e como pela lei de Gauss $\nabla \cdot \vec{B} = 0$, pois não há monopolos magnéticos, então:

$$\nabla^2 \vec{B} - \frac{1}{\lambda_L^2} \vec{B} = 0 \quad (3.12)$$

sendo

$$\lambda_L = \left(\frac{m_p}{n_S \cdot \mu_0 \cdot q^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.13)$$

Considerando o caso unidimensional, a equação 3.12 se reduz:

$$\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial x^2} - \frac{\vec{B}}{\lambda_L^2} = 0 \quad (3.14)$$

cuja solução é do tipo: $B = B_0 \cdot e^{\frac{-x}{\lambda_L}}$.

A solução acima indica que o campo magnético é atenuado numa fina camada de espessura λ_L na superfície do material, caindo a zero no interior do mesmo. A quantidade λ_L , é conhecida como comprimento de penetração do campo magnético no interior do supercondutor. A 2ª equação de London prevê a ocorrência do Efeito Meissner, pois sua solução indica que o campo tende a zero no interior da amostra. A figura 3.10 ilustra este fenômeno.

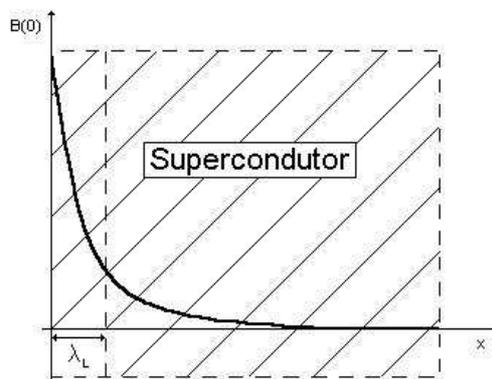


Figura 3.10: Penetração do fluxo magnético no interior de um supercondutor.

A profundidade de penetração varia com a temperatura, tornando-se mínima em $T = 0$ e torna-se infinita quando $T = T_C$, que é a penetração completa do campo magnético no supercondutor à temperatura crítica.

3.2.6 Comprimento de Coerência

Em 1950, os físicos soviéticos L. D. Landau e V. L. Ginzburg formularam uma nova teoria, desta vez para explicar as propriedades termodinâmicas da transição do estado normal para o estado supercondutor. Assim como a teoria de London, esta também é fenomenológica, isto é, faz uso de suposições *ad-hoc*, cuja justificativa é que elas descrevem corretamente a transição de fase em campo nulo.

A primeira suposição da teoria de Ginzburg-Landau refere-se à idéia intuitiva de que um supercondutor contém uma densidade de superelétrons n_s e uma densidade de elétrons normais $n - n_s$, onde n é a densidade total de elétrons no metal. O comportamento e a existência dos superelétrons pode ser descrito por uma função da onda efetiva Ψ que tem a seguinte interpretação física: $|\Psi|^2 = n_s$. Além disso, $\Psi(x) \neq 0$ no estado supercondutor, mas zero no estado normal. Assim, $\Psi(x)$ é o parâmetro de ordem de transição, existindo para temperatura abaixo da Temperatura crítica (T_C) e valendo a zero acima de T_C . Ou seja,

$$\begin{aligned} \Psi(x) &= 0 & \text{se } T > T_C \\ \Psi(x) &\neq 0 & \text{se } T < T_C \end{aligned} \quad (3.15)$$

Então pode-se dizer que a função que descreve o par supercondutor, função densidade de probabilidade, é dada por:

$$\Psi(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{e^{i(k+\Delta q)x} + e^{ikx}\} \quad (3.16)$$

na qual, k é o vetor de onda, ou momento de onda, do elétron e Δq é o acréscimo no vetor de onda, então:

$$\Psi^* \cdot \Psi = \frac{1}{2} \{e^{-i(k+\Delta q)x} + e^{-ikx}\} \{e^{i(k+\Delta q)x} + e^{ikx}\} \quad (3.17)$$

$$\Psi^* \Psi = 1 + \cos(\Delta qx) \quad (3.18)$$

A equação 3.18 apresenta a função probabilidade. A energia de distribuição de densidade modulada é:

$$\int \Psi^* \left(\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} \right) \Psi dx = \frac{1}{2} \frac{\hbar^2}{2m} [(k + \Delta q)^2 + k^2] \quad (3.19)$$

na qual m é a massa do superelétron e \hbar é a constante de Plank. Desprezando-se q^2 pois $q \ll k$, tem-se:

$$\int \Psi^* \left(\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} \right) \Psi dx \approx \frac{\hbar^2}{2m} k^2 + \frac{\hbar^2}{2m} k \Delta q \quad (3.20)$$

Logo, o acréscimo da energia necessária para a modulação é:

$$\frac{\hbar^2}{2m} k \Delta q \quad (3.21)$$

Se o acréscimo de energia superar a lacuna de energia ΔE_S , a supercondutividade será destruída. O valor crítico q_0 do vetor de onda de modulação é dado por:

$$\frac{\hbar^2}{2m} k_F q_0 = E_g \quad (3.22)$$

sendo k_F a energia do estado de Fermi e E_g o acréscimo de energia.

Definindo-se um comprimento de coerência intrínseco ξ_0 relacionado com a modulação crítica por $\xi_0 = \frac{1}{q_0}$, tem-se:

$$\xi_0 = \frac{\hbar^2 k_F}{2m E_g} \Rightarrow \xi_0 = \frac{\hbar^2 V_F}{2 \Delta E_S} \quad (3.23)$$

na qual V_F é a velocidade do estado de Fermi.

O parâmetro ξ_0 é chamado de comprimento de coerência. Esse parâmetro é a distância característica que relaciona os Pares de Cooper, correlacionando spin e momento num supercondutor.

O conceito de comprimento de coerência intrínseco foi introduzido por Pippard em 1953. Quer dizer que só os elétrons que têm energia cinética inferior à energia de Fermi podem participar da supercondutividade.

3.2.7 Supercondutor do tipo I e supercondutor do tipo II

Foi visto anteriormente que a profundidade de penetração (λ_L) e o comprimento de coerência (ξ_0) são parâmetros muito importantes para a caracterização do estado supercondutor. A maneira mais simples de explicar a diferença entre um supercondutor do tipo I e do tipo II, consiste na comparação da ordem de grandeza destes dois parâmetros.

Para um supercondutor do tipo I, a profundidade de penetração é muito menor do que o comprimento de coerência ($\lambda_L \ll \xi_0$). Para um supercondutor do tipo II a profundidade de penetração é muito maior do que o comprimento de coerência ($\lambda_L \gg \xi_0$), figura 3.11.

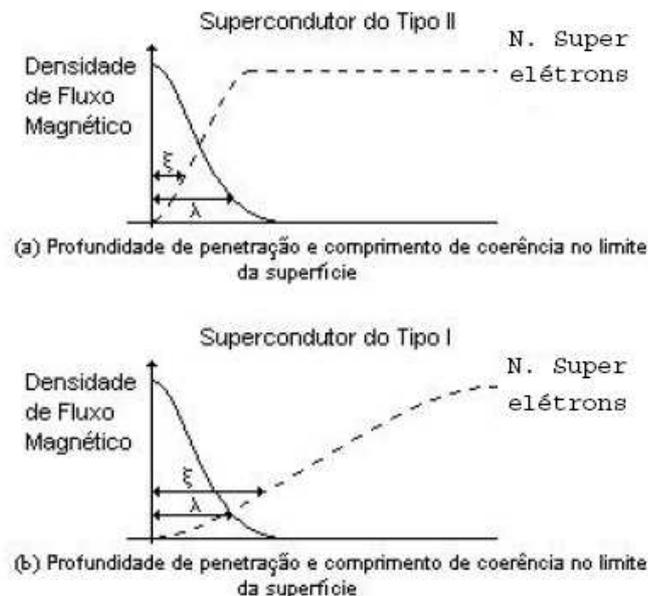


Figura 3.11: Profundidade de penetração e comprimento de coerência no limite da superfície de um supercondutor do tipo I e do tipo II.

O efeito Meissner só é estritamente obedecido no caso do supercondutor do tipo I. No caso do tipo II, a indução magnética não se anula rapidamente à medida que penetra no

supercondutor. É devido a essa propriedade, que o tipo II pode suportar um campo magnético crítico mais elevado do que o campo crítico suportado pelo tipo I.

A penetração do campo magnético num tipo II depende da existência de vórtices quantizados, que geram campos magnéticos locais e que obedecem à regra de quantização do fluxo magnético.

3.3 Teoria BCS

Agora será abordada a teoria da supercondutividade numa visão microscópica do fenómeno, tentando explicar por princípios físicos como aparece a propriedade dos superelétrons. É conhecida como Teoria BCS (ver penúltimo parágrafo da Seção 2.1).

3.3.1 A interação Elétron-Rede

Sabe-se que os elétrons livres, que formam um gás em torno da rede de íons, são espalhados quando se deparam com desvios da periodicidade perfeita: vibrações térmicas, impurezas e imperfeições. Os elétrons interagem com a rede, interação elétron-rede, e esta interação é que determina a resistividade dos materiais. Já que tanto o momento quanto a energia devem ser conservados quando um elétron é espalhado, um modo de vibração da rede deve ser excitado no processo de espalhamento. Este movimento de vibração é quantizado e se tem, então, a emissão (ou absorção) de um fónon. Assim como um fóton é uma partícula resultante da quantização de uma onda eletromagnética, um fónon pode ser considerado uma partícula resultante da quantização de uma onda sonora oriunda das vibrações de uma rede cristalina. A interação elétron-rede é, então, chamada interação elétron-fónon.

O primeiro passo para o estudo microscópico da supercondutividade foi dado por Fröhlich, em 1950, quando demonstrou que a interação elétron-fónon poderia ocasionar uma ligação entre dois elétrons. Logo depois da hipótese pioneira de Fröhlich, Bardeen desenvolveu uma teoria semelhante, mostrando que o elétron muda seu comportamento em decorrência da sua interação com os fónons da rede cristalina. Antes da hipótese de Fröhlich e de Bardeen, imaginava-se que a interação entre dois elétrons deveria ser sempre repulsiva (em virtude da repulsão coulombiana). Uma atração parece contradizer conceitos fundamentais da eletricidade: duas cargas iguais se repelem, e portanto, dois elétrons, ambos com carga negativa, deveriam se repelir. Mas isso só se verifica para duas cargas no vácuo e o estudo da interação elétron-fónon mostrou que tal interação pode resultar em uma interação atrativa entre dois elétrons no interior de uma rede cristalina.

O passo seguinte para a elaboração da teoria BCS foi dado por Cooper ao demonstrar que, sob certas condições, o gás de Fermi, formado pelos elétrons normais, torna-se instável possibilitando a formação de pares de elétrons ligados, hoje conhecidos como pares de Cooper. A teoria BCS recebeu um impulso final com o famoso trabalho de seus três autores: Bardeen, Cooper e Schrieffer. É possível entender qualitativamente como pode ocorrer atração entre dois elétrons.

Sejam dois elétrons viajando pela rede cristalina constituída por íons positivos. Como estes íons não são rigidamente ligados à rede, pode ocorrer uma ligeira distorção da mesma, os íons se deslocam de sua posição de equilíbrio, provocada pela atração coulombiana entre os elétrons e os íons situados nas suas vizinhanças imediatas. Sendo assim, a densidade das cargas positivas próximas aos elétrons torna-se maior do que a densidade das cargas positivas mais afastadas. Esta variação de densidade é instável e a rede cristalina deverá sofrer um processo de relaxação emitindo um fónon com uma frequência característica deste processo de relaxação. Se os elétrons se cruzarem num intervalo de tempo menor do que o intervalo de tempo deste processo de relaxação (por serem partículas pesadas, os íons possuem uma inércia maior que os elétrons, demorando um certo tempo para retornar à posição original) eles estarão numa rede distorcida. Deste modo, eles serão atraídos para a região onde existe um excesso de polarização das cargas positivas; esta atração poderá superar a repulsão coulombiana entre os elétrons, produzindo, portanto, uma atração efetiva entre eles.

Trata-se, portanto, de uma interação ocorrida devido ao deslocamento da rede cristalina e retardada no tempo, mas suficiente para formar pares de elétrons, os pares de Cooper. Quando tais forças dominam a cinética dos elétrons, o material é supercondutor. A distância entre os dois elétrons que formam o par de Cooper é da ordem do comprimento de coerência (ξ). Seu valor é de 16000Å para o alumínio puro e 380Å para o nióbio puro, por exemplo. Da Mecânica Quântica, pode-se mostrar que os elétrons que formam o par têm momento opostos e spins opostos de tal forma que o momento total do par é zero. Pela relação de Broglie, $p = h/\lambda$ sendo p o momento, λ o comprimento de onda e h a constante de Plank. Como p é nulo, a onda associada tem comprimento de onda infinito. Fisicamente, o comprimento de onda é da ordem do tamanho da amostra. Isto indica que a supercondutividade é um fenômeno quântico em escala macroscópica.

Observa-se então que a interação elétron-fónon é capaz de acoplar dois elétrons de tal maneira que eles se comportam como se existisse uma interação direta entre eles. Nesta interação postulada por Fröhlich, um elétron emite um fónon, o qual é imediatamente absorvido por outro elétron. Pode-se pensar esta interação entre os elétrons como sendo transmitida por um fónon.

3.3.2 Resistividade nula e pares de Cooper

Nos supercondutores, sabe-se da possibilidade de forças atrativas entre elétrons cujo efeito é significativo, fazendo com que os elétrons organizem-se aos pares, os pares de Cooper. O caráter quântico dos elétrons (são férmions, ou seja, segundo o Princípio de Exclusão de Pauli não podem ocupar o mesmo estado quântico) faz com que o estado supercondutor não seja constituído simplesmente por um gás de pares. As leis fundamentais da Mecânica Quântica exigem que estes pares sejam incapazes de se movimentar de forma independente, na verdade, estes pares se movem coerentemente com a mesma velocidade, sendo considerados bósons e, portanto, podendo ocupar o mesmo estado quântico. Em um metal normal, a corrente elétrica se estabelece quando a maioria dos elétrons se move em uma dada direção preferencial, ocorrendo o espalhamento do elétron por qualquer imperfeição da periodicidade da rede, como visto anteriormente. Isto faz com que ele mude a direção e velocidade do movimento com a restrição imposta pelo princípio de exclusão de Pauli. Devido a esses espalhamentos, a corrente mantém-se constante somente se for mantido um campo elétrico aplicado; caso contrário, a resistividade faz com que a corrente elétrica decaia.

Em um supercondutor, os pares de Cooper podem ocupar o mesmo estado quântico, não estando sujeitos, portanto, ao Princípio de Exclusão, válido para elétrons isolados. Para deter uma corrente formada por pares de Cooper, deve-se então deter simultaneamente todos os pares de Cooper que se movimentam com uma dada velocidade. É natural pensar que uma impureza ou pequenas vibrações da rede não possam deter o movimento de milhares de trilhões de pares de Cooper que se movem com esta velocidade. Se a energia térmica não for suficiente para destruir os pares, a corrente flui indefinidamente. O material apresenta então resistividade nula.

3.4 Conclusões

A supercondutividade é um fenômeno de conhecimento relativamente recente (um século), entretanto sua aplicação no dia-a-dia potencializa-se à medida que são descobertos compostos com maior temperatura crítica. Tais compostos têm-se classificados como supercondutores do tipo II pois, além da maior temperatura crítica, também apresentam maior corrente crítica. Destaca-se o comportamento como tal das cerâmicas supercondutoras, assunto que é tratado no Capítulo 4, especificamente do composto empregado neste trabalho.

Capítulo 4

Produção das Cerâmicas Supercondutoras

4.1 Síntese das cerâmicas supercondutoras

Nesta dissertação emprega-se o supercondutor cerâmico $Hg_{0,82}Re_{0,18}Ba_2Ca_2Cu_3O_{8+\delta}$, cuja temperatura de transição T_c vale 77K, a maior até esta data.

O procedimento de síntese da cerâmica supercondutora se inicia com a preparação do precursor da cerâmica através de reações sólidas. Esse processo é muito importante na síntese de alta pressão de supercondutores a base de mercúrio [16]. Esse procedimento de preparação do precursor é similar aos relatados por Sin et al. [13, 16]. Primeiro mistura-se $Ba_2Ca_2Cu_3O_x$ (99% PARAXAIR) e ReO_2 (99% Aldrich) em forma de pó com a relação molar 1:0.18 (1 mol de $Ba_2Ca_2Cu_3O_x$ e 0.18 mol de ReO_2). Esse pó é homogeneizado em um morteiro de ágata e são compactados com uma pressão uniaxial de 0,5GPa. As pastilhas são tratadas termicamente a uma temperatura de 850°C em um fluxo de oxigênio por 15h. O precursor obtido é esmagado e homogeneizado e compactado novamente. Após isso, é submetido a um novo tratamento térmico a 930°C por 12h em um fluxo de oxigênio. Esse último procedimento é repetido por mais três vezes.

O precursor obtido é então submetido a um novo tratamento de 930°C por 24h em um fluxo com a mistura de gases argônio (99,5%) e oxigênio (99,5%) mantendo a pressão de 1bar. Para as amostras usadas neste trabalho, o controle da mistura dos gases foi feito com um misturador de gás da marca Quanta Chrome Inc. com controle de taxa de fluxo. Foram preparados três precursores cerâmicos com distintas pressões parciais de oxigênio: 5% de O_2 95% de Ar (amostra A), 10% de O_2 90% de Ar (amostra B) e 15% de O_2 85%

de Ar (amostra C) [12]. Finalmente, aos precursores preparados com diferentes pressões parciais de O_2 é misturado HgO com relação molar de 1:0.82. Após isso os precursores são novamente homogeneizados em um morteiro de ágata e compactados com uma pressão uniaxial de $1GPa$ formando barras. As barras, com dimensões típicas de $5 \times 5 \times 20mm^3$, são embrulhadas em folhas de ouro (com 99,999% de pureza) e introduzidas em um tubo de quartzo com $8mm$ de diâmetro interno. Além disso, é introduzido junto com a barra um bastão de quartzo ($7mm$ de diâmetro e $40mm$ de comprimento). A folha de ouro recebe o excesso de mercúrio e forma um amálgama. Baseado no estudo do efeito do tubo de quartzo, foi usado fator de preenchimento $ff \cong 1,0g.cm^{-1}$ [11] e fator de preenchimento do mercúrio $ff_{Hg} \cong 0,010g.cm^{-1}$ [15]. A razão entre o excesso de mercúrio e a massa da folha de ouro na forma de amálgama é 0,045. O tubo é selado em alto vácuo de 3×10^{-6} torr. A densidade média do precursor compactado é $\rho = 4.2(2)g/cm^3$. Todo procedimento é realizado no interior de uma caixa de luva com atmosfera de gás argônio. Para favorecer o crescimento do tamanho dos grãos, foi mudado o tratamento térmico para $72h$ a $865^\circ C$, comparado ao tratamento em Sin et al. [12]. Os três tubos de quartzo (cada um com uma amostra em seu interior) são instalados juntos em um mesmo local no interior do forno com mesma pressão isostática.

As cerâmicas A, B e C são rotuladas como *underdoped*, *optimal doped* e *overdoped*, respectivamente. As cerâmicas exibem temperatura crítica a pressão ambiente ($T_{C0} = 132.6, 133.2$ e $132.7K$) bastante próximas, dando a impressão, que possuem o mesmo teor de oxigênio. Entretanto, como foi mostrado em [29, 30], a T_{C0} não é um parâmetro suficiente para definir o teor de oxigênio nas amostras. Foi ainda observado que as medidas de susceptibilidade em corrente alternada sobre pressão hidrostática externa, P , é uma importante ferramenta para confirmar o teor de oxigênio. Essas amostras têm apresentado valores distintos de dT_C/dP ($8(1), 1.9(3)$ e $-1.61(1)K/GPa^{-1}$), que é associado com a dopagem (*underdoped*, *optimal doped* e *overdoped* respectivamente).

4.2 Medidas de Corrente Crítica

Para o procedimento da medida de corrente crítica, são retiradas pequenas amostras das cerâmicas, com dimensões $1 \times 7 \times 1mm^3$ que são fixadas em um suporte de safira, usando verniz GE. Quatro contatos, feitos com fios de ouro, são fixados sobre cada amostra através de tinta prata. A resistência média achada é de $5 \pm 1\Omega$ para cada contato. A corrente é aplicada pela fonte de corrente KEITHLEY 228A e o valor da tensão é obtido usando um voltímetro digital KEITHLEY 182. A densidade de corrente crítica, J_c , é definida pelo uso do critério do campo elétrico de $10\mu V/mm^{-1}$ [19, 20]. As curvas VxI são obtidas invertendo-se

a direção da corrente aplicada na amostra para evitar a influência da resistência de contato. A temperatura é medida através de um termopar de cobre-constantan preso à safira e ligado a um multímetro HP 34401A. Todos os dados são registrados por um computador usando interface IEEE-488.

4.3 Análise de Corrente Crítica

A Figura 4.1 mostra a dependência da densidade de corrente crítica com a temperatura normalizada ($t = T/T_C^*$) para amostras com diferentes pressões parciais de oxigênio. Essas medidas foram feitas sem a aplicação de um campo magnético. Comparando as três curvas das amostras, demonstram que J_C é sensível ao teor de oxigênio. A amostra B apresenta o maior valor de J_C a baixa temperatura, que está relacionado com o tamanho médio da área de junção entre os grãos. Também pode-se notar que há uma queda no valor da densidade de corrente crítica com o aumento da temperatura.

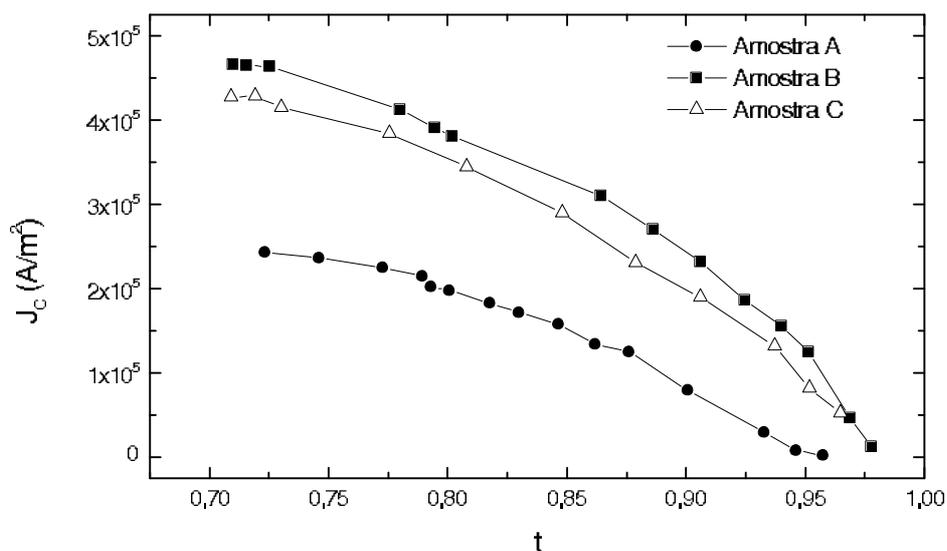


Figura 4.1: Curva da dependência da densidade de corrente crítica em função $t(T/T_C^*)$ para amostras com diferentes teores de oxigênio.

Na Figura 4.2 foi traçada a curva de densidade de corrente crítica normalizada ($J_C/J_C(0)$) em função da temperatura normalizada ($t = T/T_C^*$). $J_C(0)$ é obtido estendendo a curva de densidade de corrente até $T = 0K$ e T_C^* é a temperatura crítica entre as junções dos grãos. Ambos T_C^* e ($J_C/J_C(0)$) foram determinados por um ajuste de dados, conforme feito em [14].

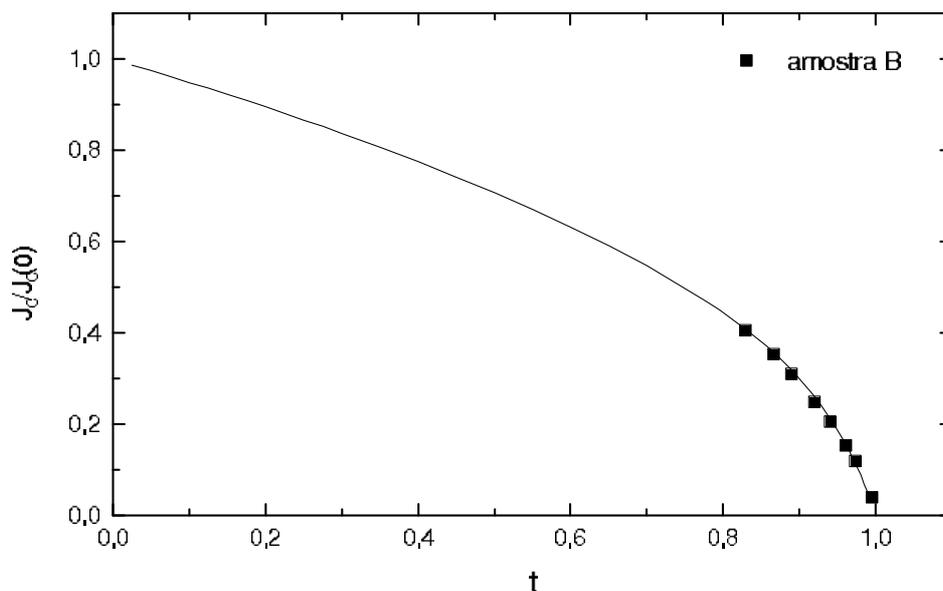


Figura 4.2: Densidade de corrente crítica normalizada ($J_c/J_c(0)$) em função da temperatura normalizada (T/T_C^*) da amostra B.

4.4 Conclusão

O resultados mostraram que a amostra policristalina B (*Optimal doped*) apresenta a maior densidade de corrente crítica, determinando que a cerâmica preparada com o precursor 10% de O_2 90% de Ar apresenta maior densidade de corrente crítica, tornando-se a cerâmica supercondutora adotada neste trabalho que tem como objetivo a aplicação de supercondutores em dispositivos limitadores de corrente. A partir das medidas de densidade de corrente crítica realizadas nesta etapa, também foi possível determinar a densidade de corrente crítica da cerâmica para qualquer temperatura.

Uma vez produzida a cerâmica supercondutora, ela pode ser empregada na confecção de limitadores de corrente, como definido no Capítulo 2. O Capítulo 5 apresenta o projeto de um protótipo de um DLCFS resistivo com a cerâmica aqui especificada.

Capítulo 5

Projeto do Protótipo de Limitador de Corrente de Falta Resistivo

5.1 Introdução

O projeto do limitador de corrente supercondutor resistivo depende da característica do sistema elétrico, quanto ao seu comportamento estático e dinâmico, no que se refere à inserção de uma resistência elétrica no instante da falta.

Esse capítulo apresenta o projeto do dispositivo com a especificação da corrente e da resistência que deve ser adicionada ao sistema através do limitador. A cerâmica supercondutora $Hg_{0,82}Re_{0,18}Ba_2Ca_2Cu_3O_{8+\delta}$ é que será usada, como informado em capítulo precedente.

5.2 Levantamento dos dados necessários para realização do projeto

5.2.1 Raio-x

As medidas de raio-x, figura 5.1, são usadas para observar a evolução do teor de oxigênio na estequiometria do composto [28, 35] durante os passos de preparação da cerâmica supercondutora. Além disso, mostra a estequiometria final da cerâmica, servindo como um identificador da amostra.

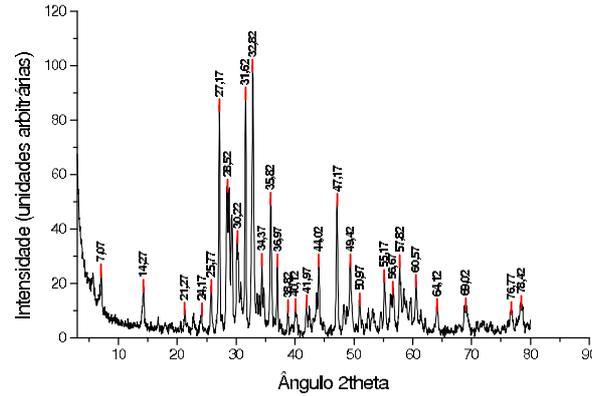


Figura 5.1: Raio-x da amostra.

5.2.2 Susceptibilidade

As curvas de susceptibilidade magnética em corrente alternada são obtidas usando o susceptômetro, figura 5.2, e a partir delas é calculada a temperatura crítica (T_C) da cerâmica supercondutora.

O princípio usado para a realização desta medida é colocar duas bobinas idênticas em oposição de fase, sendo que uma das bobinas envolve o material supercondutor, bobina 2 na figura 5.2. Além dessas bobinas em oposição de fases, existe uma outra que é alimentada por uma fonte de corrente alternada, gerando um campo magnético \vec{B} que induzirá tensão nas bobinas 1 e 2.

Considerando ω a frequência da rede, v_1 a tensão na bobina 1, v_2 a tensão na bobina 2, A a área das bobinas 1 e 2 e χ_M a susceptibilidade magnética do material supercondutor, pode-se escrever:

$$B = B_0 \cos(\omega t) \quad (5.1)$$

$$v_1 = -A \cdot \frac{d}{dt} B_1 = -A \frac{d}{dt} B \quad (5.2)$$

$$v_2 = -A \frac{d}{dt} B_2 = -A \frac{d}{dt} [(1 + \chi_M) B] \quad (5.3)$$

$$v_1 = AB_0 \omega \sin(\omega t) \quad (5.4)$$

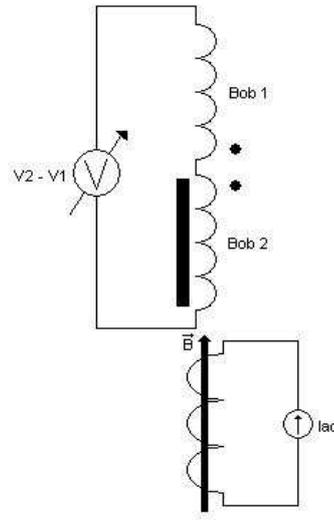


Figura 5.2: Mostra o esquemático de um Susceptômetro.

$$v_2 = A(1 + \chi_M)B_0\omega \text{sen}(\omega t) \quad (5.5)$$

$$\chi_M = \frac{V_2 - V_1}{AB_0\omega} \quad (5.6)$$

Desta maneira, é possível obter a curva de susceptibilidade magnética, apresentada na figura 5.3.

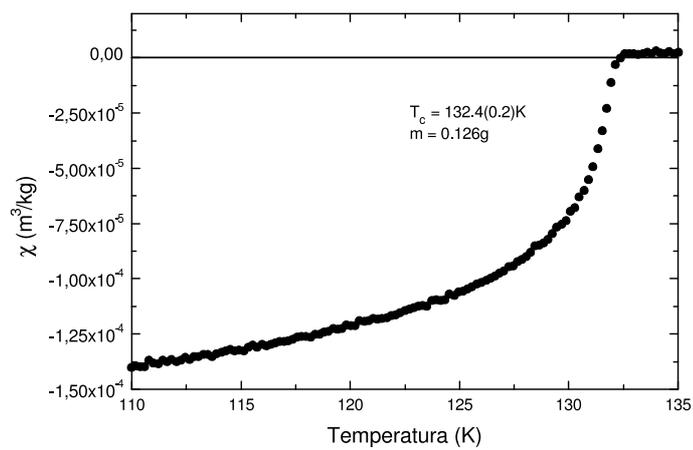


Figura 5.3: Susceptibilidade magnética.

5.2.3 Curva de Densidade de Corrente Crítica

Para obter as curvas de densidade de corrente crítica, foi necessário obter valores de correntes críticas para diversas temperaturas como descrito no capítulo 4. Com estes valores, foi ajustada uma curva através da equação 5.7, de acordo com [14], resultando na curva característica da densidade de corrente crítica da cerâmica supercondutora que será utilizada pelo dispositivo.

$$J_C(T) = a \left(1 - \frac{T}{T_C}\right)^{0.5} \tanh\left(\frac{b \left(1 - \frac{T}{T_C}\right)^{0.5}}{T}\right) \quad (5.7)$$

O ajuste através da equação 5.7, foi realizado pelo programa Gnuplot 4.1, obtendo os seguintes ajustes, figura 5.4:

$$\begin{aligned} a &= 5,04 \cdot 10^5 \pm 0,09 \cdot 10^5 \\ b &= 8 \cdot 10^2 \pm 2 \cdot 10^2 \\ T_C &= 128,5 \pm 0,3 \end{aligned}$$

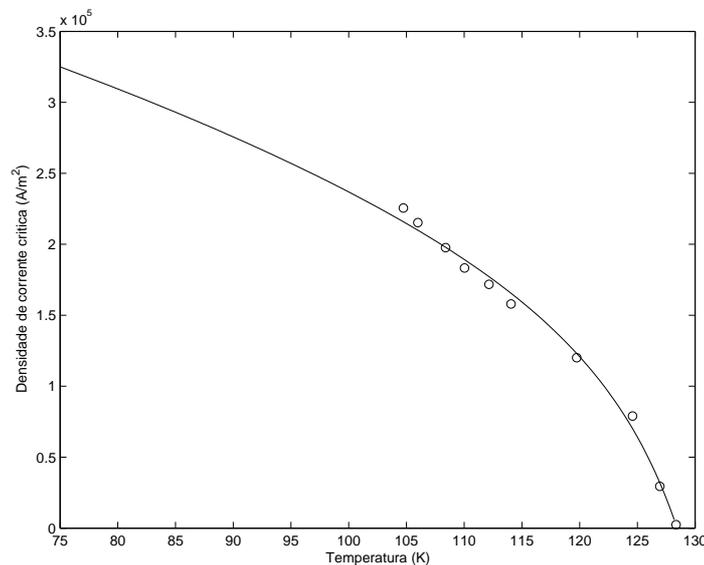


Figura 5.4: Densidade de corrente crítica (J_C) em função da temperatura (T)

A curva de densidade de corrente crítica, J_C , é necessária para obter o valor da densidade para qualquer temperatura à qual a amostra estará sujeita.

5.2.4 Curva de Resistividade

Da mesma forma que foi feito para as medidas de corrente crítica, são retiradas amostras cerâmicas com dimensões $1 \times 7 \times 1 \text{ mm}^3$ que são fixadas num suporte de safira, usando verniz da marca GE. Quatro contatos, feitos com fios de ouro, são fixados sobre cada amostra através de tinta prata. Uma corrente de $0,04 \text{ mA}$ é aplicada na amostra pela fonte KEITHLEY 228 e o valor de tensão é obtido usando um voltímetro KEITHLEY 182, enquanto que a temperatura da amostra varia até que alcance a temperatura ambiente.

Após isso, é realizado um novo experimento em que retira-se uma amostra $3 \times 4 \times 3 \text{ mm}^3$ e se aplica uma corrente de 10 A e obtém-se o valor de tensão sobre a amostra através de um multímetro. A partir deste ensaio, realizou-se um ajuste na curva de resistividade da cerâmica para amplitudes de correntes da ordem de funcionamento do dispositivo. A curva de resistividade em função da temperatura para correntes na ordem de 10 A é mostrada na figura 5.5.

Com a curva da figura 5.5 obtém-se a resistividade da cerâmica, em qualquer temperatura, quando a mesma estiver no estado normal. Para isso é necessário realizar o ajuste de uma reta na curva de resistividade usando o intervalo de temperatura em que a amostra encontra-se fora do estado supercondutor. Expande-se esta reta para temperatura inferiores à temperatura crítica. Com essa reta estendida, pode-se determinar a resistividade do material quando ele deixar o estado supercondutor, em qualquer temperatura inferior à temperatura crítica, conforme mostra a figura 5.5.

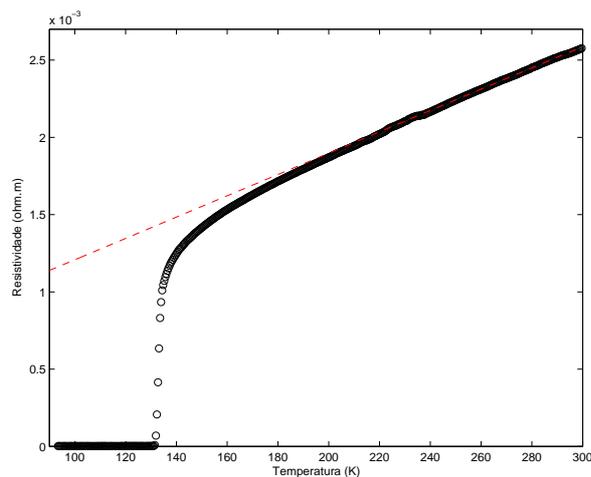


Figura 5.5: Resistividade (ρ) em função da temperatura (T).

5.3 Confeção do Protótipo

O protótipo que almeja confeccionar com o objetivo de confirmar o bom desempenho da cerâmica supercondutora $Hg_{0,82}Re_{0,18}Ba_2Ca_2Cu_3O_{8+\delta}$ como limitador resistivo de corrente de falta, deve apresentar uma resistência R no estado normal de $0,7 \Omega$, e uma corrente de falta, I_F , de $2A$. Tais valores são compatíveis com os equipamentos disponíveis em laboratórios para ensaios.

5.3.1 Autenticidade das cerâmicas supercondutoras

A análise de raio-x é o primeiro passo, pois apresenta, a assinatura da amostra. Caso o raio-x da amostra não seja igual ao raio-x das amostras anteriores, isso informa que houve algum erro na fabricação da amostra, e todas as curvas características aqui analisadas não serão válidas.

5.3.2 Determinação da Temperatura Crítica da Cerâmica

A análise da susceptibilidade é usada para determinar a temperatura crítica do material supercondutor, T_C , uma vez que o supercondutor é um diamagnético quase perfeito. No momento da transição do estado normal para o estado supercondutor, o material deve apresentar a propriedade diamagnética.

Da curva de susceptibilidade, obtém-se a T_C do material, que no caso da cerâmica supercondutora usada neste trabalho é igual a $132,5 K$. Com esta temperatura, o material pode ser resfriado com nitrogênio líquido na temperatura de $77 K$, o que torna o sistema economicamente viável.

5.3.3 Determinação da área da cerâmica supercondutora do protótipo

Para determinar a área do supercondutor do protótipo, é necessário conhecer a temperatura em que a cerâmica estará submetida e a densidade de corrente crítica nesta temperatura.

A cerâmica será resfriada com nitrogênio líquido, então a temperatura de funcionamento será $77 K$. Pela figura 5.4, a densidade de corrente crítica, J_c , desse supercondutor nesta temperatura é $3,1885 \times 10^5 A/m^2$. Como foi especificado que o dispositivo deverá ter uma corrente de falta, I_F de $2A$, então:

$$I_C = Area \times J_C \Rightarrow Area = 6,27 \times 10^{-6} m^2 \Rightarrow Area = 6,27 mm^2 \quad (5.8)$$

5.3.4 Determinação do comprimento da cerâmica supercondutora do protótipo

O comprimento é obtido através da resistência que esse protótipo deverá apresentar, e que foi especificada igual a $0,7 \Omega$. Analisando a figura 5.5, observa-se que a cerâmica, quando sair do estado supercondutor, à temperatura de 77 K , deverá apresentar uma resistividade ρ de $0,001 \Omega \times m$. A resistência R é escrita como:

$$R = \rho \times \frac{\text{Comprimento}}{\text{Area}} \quad (5.9)$$

sendo

$$\text{Comprimento} = 4,4 \times 10^{-3} m = 4,4 mm \quad (5.10)$$

5.3.5 Ponta de fixação da cerâmica supercondutora

Foi necessário construir uma ponta de fixação para manter o supercondutor imerso no nitrogênio. A ponta foi confeccionada em aço inox por apresentar um pequeno coeficiente de dilatação térmica, $0,0172 \frac{mm}{m} ^\circ C$, resultando numa pequena dilatação quando a temperatura variar até 77 K .

A ponta de fixação é composta de um cilindro de diâmetro igual a $30 mm$ e altura igual a $45 mm$, no qual foi feito uma fenda de $16 mm$ e $20 mm$ de profundidade, como é mostrado na figura 5.6. Na altura de $35 mm$, foram colocados dois parafusos, um de cada lado, que serão usados para fixação da cerâmica.

Além dos parafusos também foram usadas, para fixação da cerâmica e melhorar a resistência física, duas chapas de aço inox de $1 mm$ de espessura presa aos parafusos na parte interna da fenda. Junto às placas de aço inox, foram colocadas duas placas de circuito impresso, placa epoxi com uma superfície de cobre que realiza contato com a cerâmicas e faz o isolamento do aço inox.

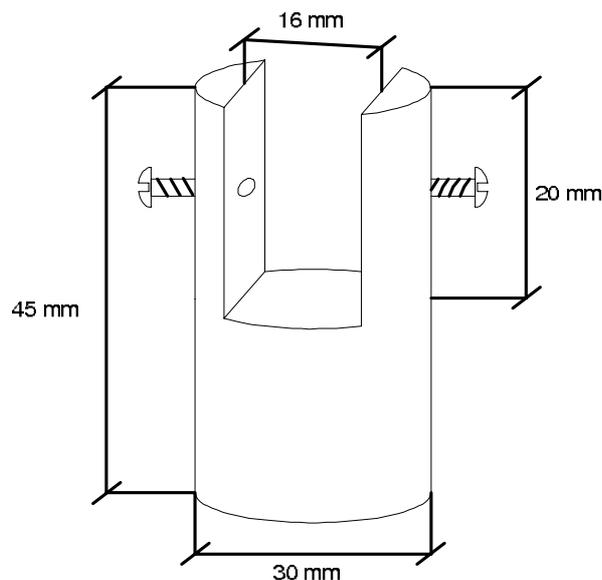


Figura 5.6: Ponta de fixação da cerâmica supercondutora.

5.3.6 Montagem do dispositivo

Uma pastilha de cerâmica (A) com as dimensões de $2,6 \times 2,4 \times 4 \text{ mm}^3$, em cujas extremidades foi passado tinta prata para realização dos contatos, é colocada entre as placas de circuito impresso (B), que são pressionadas pelas placas de aço inox (C) e os parafusos (D). As placas de circuito impresso são ligadas a dois cabos (E). A ponta de fixação é presa em uma haste (F) por onde passam os cabos que farão contatos com o circuito elétrico, como pode ser visto na figura 5.7. A haste é fixada em um tripé e a ponta é mergulhada em um reservatório térmico de 1 litro, onde é colocado nitrogênio líquido baixando a temperatura da cerâmica a 77 K.

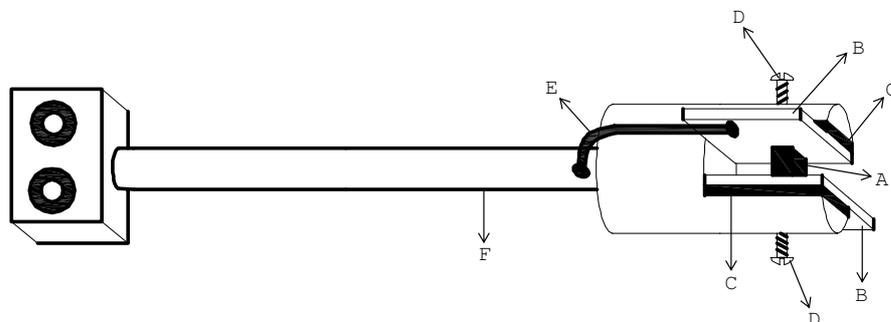


Figura 5.7: Ponta de fixação da cerâmica supercondutora com a haste.



Figura 5.8: Vista de lado da bancada do limitador de corrente.

As figuras 5.8 e 5.9 mostram a bancada montada no laboratório do SUPERA, para os ensaios do dispositivo limitador de corrente.



Figura 5.9: Vista de frente da bancada do limitador de corrente.

5.4 Conclusão

Para realização do protótipo, é necessário levar em consideração as características do sistema em que ele será instalado. No caso desse protótipo, ele foi especificado de acordo com as limitações do laboratório.

O primeiro passo, adotado nesta dissertação, foi o levantamento dos dados necessários para confecção do protótipo, entre eles estão as curvas de: raio-x, susceptibilidade magnética, curva de densidade de corrente crítica e curva de resistividade. Este passo é muito importante, pois é nele que se caracteriza a cerâmica utilizada neste trabalho.

O segundo passo é a confecção do protótipo. Este é dividido em 6 etapas:

1. Autenticidade da cerâmica supercondutora. Este item é comprovado através da comparação do raio-x de uma pequena amostra da cerâmica a ser empregada, com o raio-x da cerâmica padrão;
2. Determinação da Temperatura crítica. É obtida através da análise da curva de susceptibilidade magnética da cerâmica, sendo uma etapa muito importante porque é através dela que se determina qual deve ser a maior temperatura de trabalho;
3. Determinação da área da cerâmica. É obtida através da densidade de corrente crítica do material;
4. Determinação do comprimento da cerâmica. É obtido através da resistividade da cerâmica;
5. Construção da ponta de fixação da cerâmica supercondutora. Essa ponta realiza os contatos elétricos com a cerâmica;
6. Montagem do dispositivo.

Uma vez projetado e montado, o protótipo foi testado do ponto de vista construtivo submetendo a estrutura à situação de ensaio e verificando seu comportamento em termos de dilatação e robustez. Após confirmar-se que a estrutura funcionaria adequadamente em termos construtivos, partiu-se para o estudo do comportamento elétrico, que é apresentado no Capítulo 6.

Capítulo 6

Ensaio e resultados do protótipo

6.1 Introdução

Após o projeto e confecção do limitador de corrente de falta proposto, há a necessidade de verificar a funcionalidade do dispositivo, a fim de comprovar se os resultados obtidos experimentalmente em ensaios de laboratório apresentaram coerência com a metodologia de projeto.

Os limitadores foram construídos e ensaiados no Laboratório de Supercondutividade Aplicada - SUPERA do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, utilizando-se a infraestrutura disponível.

6.2 Montagem da bancada de ensaio do protótipo

Para realizar o ensaio no dispositivo com o objetivo de observar seu desempenho, foi criado um simulador de curto-circuito usando uma chave eletrônica, controlado por uma porta paralela de um computador PC 486 DX-2. Essa chave foi desenvolvida usando recursos oferecidos pelo Laboratório de Eletrônica de Potência e Acionamento Elétrico - LEPAC do Departamento de Engenharia Elétrica da UFES. Foi necessário também o desenvolvimento de um programa na linguagem C, capaz de controlar o tempo que a chave deve ficar fechada, além de acionar o modo de captura do osciloscópio.

A bancada, apresentada na figura 6.1, é composta por:

- Osciloscópio Tektronix TDS3014;

- Amplificador de ponteira de corrente Tektronix AM503;
- Ponteira de Corrente Tektronix A6302;
- Ponteira Isolada de tensão Tektronix P5200;
- Auto-transformador monofásico de 0 a 25V/15A;
- Três reostatos monofásicos de 0 a 5Ω/10A;
- Dispositivo limitador de corrente de falta supercondutor;
- Reservatório térmico de nitrogênio de 1l.

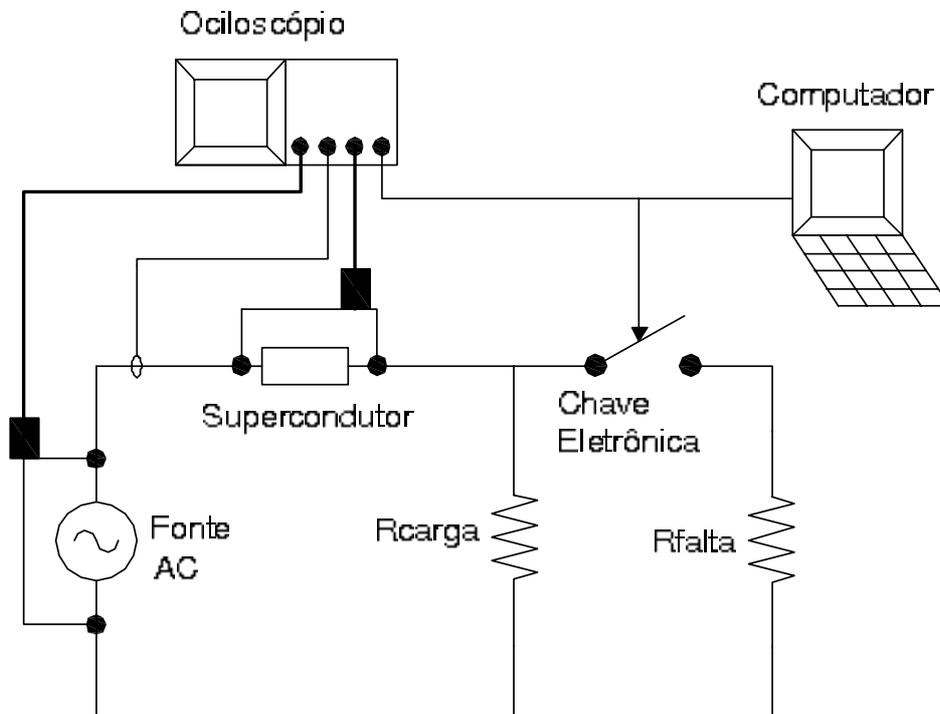


Figura 6.1: Bancada de ensaio.

No início do ensaio, o circuito só tem uma carga ligada à fonte, R_{carga} , que simula as condições normais de funcionamento da rede. Quando a chave eletrônica é fechada, é adicionada uma resistência em paralelo, R_{falta} , que simula a condição de falta. O osciloscópio armazena os dados de tempo, tensão aplicada, corrente, e tensão na pastilha supercondutora em um arquivo de dados, em formato ASCII. O arquivo é posteriormente levado a um microcomputador para, empregando o programa MATLAB, desenhar as curvas desejadas, como aquela apresentada na figura 6.2. A conexão da chave eletrônica não é sincronizada com a rede, entretanto devido à característica da mesma (TRIAC) a desconexão acaba sendo sincronizada.

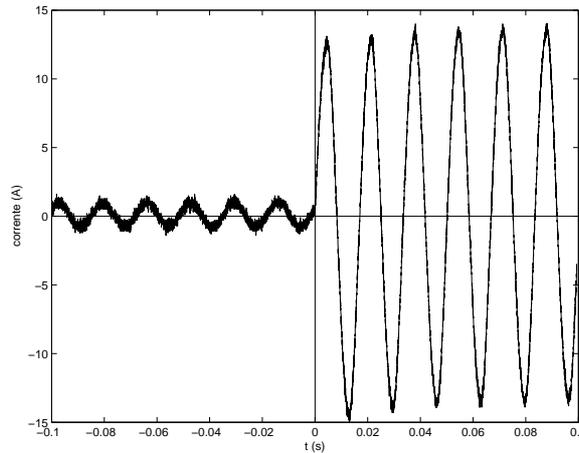


Figura 6.2: Ensaio de um curto circuito sem o limitador de corrente.

6.3 Ensaio Realizados

Vários ensaios dos dispositivos foram feitos para avaliação de seu desempenho sob condição de falta.

6.3.1 Condição Normal de operação

Sob condição normal de operação, a tensão de alimentação é de 21V, e a resistência do circuito é R_{carga} (20Ω), mais a resistência de contato do supercondutor, igual a $0,4\Omega$. Esta é a resistência que o dispositivo insere sob condições normais, uma vez que a resistência da pastilha supercondutora é nula no estado supercondutor. Assim, a corrente na condição normal de operação é 1,03 A pico.

6.3.2 Condição de operação sob falta

Primeiro Ensaio: A condição de falta é simulada pela conexão de uma resistência de 4Ω , ($R_{falta} = 4\Omega$), em paralelo com a carga de 20Ω . Com a ocorrência da condição de falta, a tensão da fonte caiu para 19,5V, a corrente de falta atingiu o valor de 4,3A e o dispositivo passou a inserir uma resistência de $1,2\Omega$ no circuito. A figura 6.3 mostra o resultado de corrente obtida neste ensaio, bem como a corrente que circula na mesma condição caso o limitador supercondutor não esteja inserido. Com o limitador há uma redução da corrente de falta de 1,7A (valor de pico), ou seja, o pico da corrente passa de 6,0A, sem o limitador, para 4,3A com o limitador.

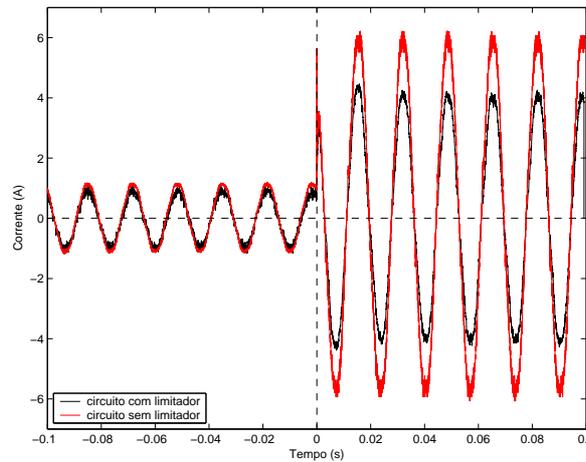


Figura 6.3: Ensaio de curto circuito com o limitador de corrente $R_{carga} = 20\Omega$ e $R_{falta} = 4\Omega$.

Segundo Ensaio: Após ocorrer a condição de falta vista no primeiro ensaio ($t = 0s$), simulada pela conexão de uma resistência de 4Ω ($R_{falta} = 4\Omega$), em paralelo com a carga de 20Ω , a condição foi retirada em $0,1367s$. Esse ensaio permitiu analisar a condição de restauração do dispositivo e o resultado é mostrado na figura 6.4.

Na condição de falta, o dispositivo se comportou como no primeiro ensaio e após a saída do sistema da condição de falta, o dispositivo imediatamente apresentou a resistência de $0,4\Omega$, conforme pode ser visto na figura 6.4.

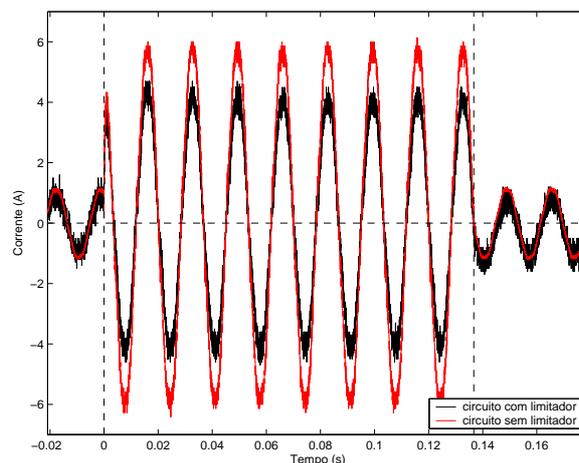


Figura 6.4: Ensaio de curto circuito com o limitador de corrente $R_{carga} = 20\Omega$, $R_{falta} = 4\Omega$ e restauração da condição normal de operação.

Terceiro Ensaio: Neste ensaio, a situação de falta foi obtida com a conexão de uma resistência de falta $R_{falta} = 1\Omega$, simulando uma falta mais severa em relação à corrente. Sob a condição de falta, a corrente de falta foi de $8,5A$ e a tensão aplicada de $18,0V$. O dispositivo

inseriu uma resistência de $1,15\Omega$ no circuito, ocorrendo uma limitação na corrente de falta de $5,5A$, já que a corrente sem o limitador deveria ser de $14,0A$, como pode ser visto na figura 6.5. A figura 6.6 ilustra o mesmo ensaio, entretanto a falta ocorre em outro ponto da senóide da tensão de alimentação.

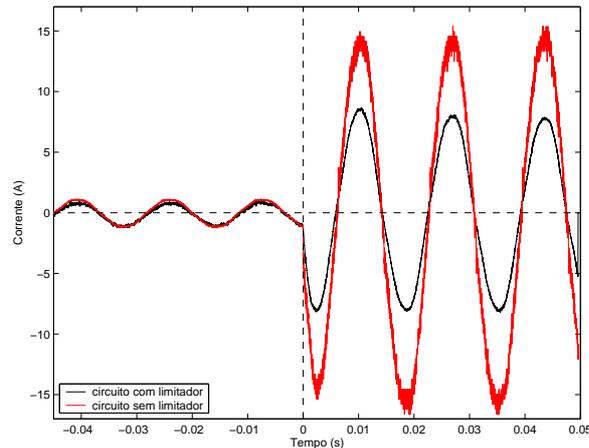


Figura 6.5: Ensaio de curto circuito com o limitador de corrente $R_{carga} = 20\Omega$ e $R_{falta} = 1\Omega$.

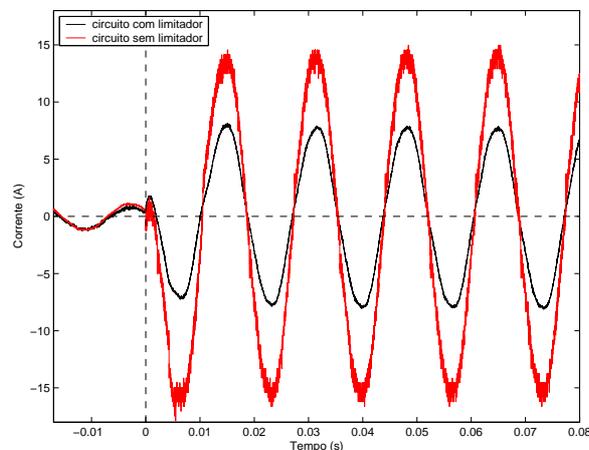


Figura 6.6: Ensaio de curto circuito com o limitador de corrente $R_{carga} = 20\Omega$ e $R_{falta} = 1\Omega$ e falta em outro ponto da senóide da tensão de alimentação.

6.3.3 Manutenção das propriedades da cerâmica supercondutora

Sob a condição de falta, a cerâmica supercondutora aquece e dissipa energia podendo degradar a conectividade intergrãos. Porém, observando a figura 6.4, vê-se que o dispositivo recupera a condição inicial assim que a falta é eliminada, sugerindo que a cerâmica

supercondutora não sofreu nenhum dano. Para confirmar esta afirmativa, novas medidas da susceptibilidade magnética foram feitas, após o dispositivo ter passado pelos testes.

A susceptibilidade magnética AC nas cerâmicas supercondutoras policristalinas apresenta uma parte real χ' e uma parte imaginária χ'' . A parte real está associada com o comportamento diamagnético do supercondutor e a parte com a dissipação de energia do quantum de fluxo magnético na região do diagrama de fases entre H_{c1} e H_{c2} , ver figura 3.5 supercondutor Tipo II. Em geral, χ'' apresenta dois picos em função da temperatura. O primeiro, menor, se localiza perto do valor da temperatura crítica e está relacionado com as propriedades intrínsecas intragrãos da cerâmica. O segundo pico aparece em temperaturas mais baixas que o primeiro e sua forma depende das características da conectividade entre grãos, (*weak link region*), da cerâmica, indicando se esta conectividade foi degradada, levando a cerâmica a perder suas propriedades supercondutoras.

A figura 6.7 mostra a susceptibilidade magnética medida em função da temperatura, antes e depois dos testes. Observe que a temperatura crítica e o comportamento diamagnético da cerâmica não se alteraram após os testes, indicando que a cerâmica não sofreu nenhum dano.

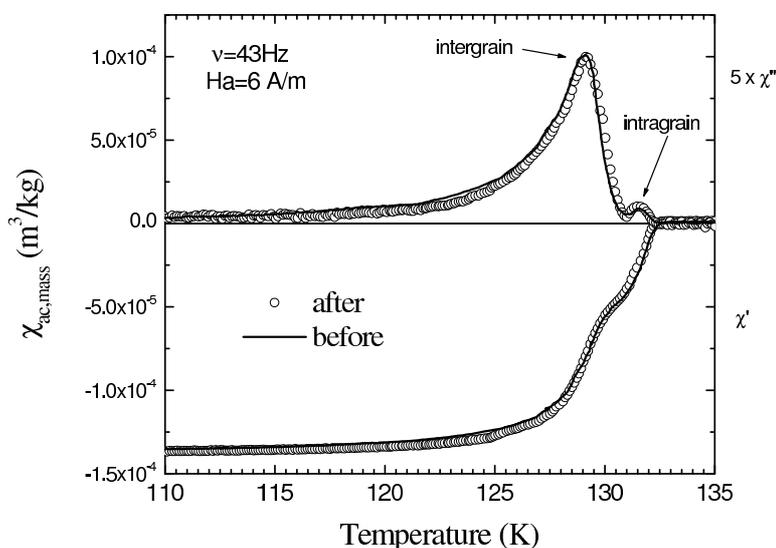


Figura 6.7: Susceptibilidade magnética AC antes e depois dos testes.

6.4 Discussão dos Resultados

O limitador de falta implementado apresentou uma resistência de funcionamento normal de $0,4\Omega$ e uma resistência de condição de falta igual a $1,2\Omega$. A resistência de $0,4\Omega$ resulta

dos condutores empregados na confecção do limitador supercondutor, acrescida da resistência de contato com a tinta prata, e do contato da resistência de aderência da tinta prata com a cerâmica supercondutora, sendo o total denominado resistência de contato. A resistência apresentada pela cerâmica supercondutora durante a falta foi de $1,2\Omega$, que é a resistência da cerâmica quando no estado normal com o acréscimo de $0,4\Omega$ devido à resistência de contato.

No primeiro ensaio, o protótipo limita a corrente de falta que é de $6,0A$ sem limitador de corrente, para $4,3A$ com limitador de corrente, tendo uma diminuição percentual na corrente de $28,3\%$. Observa-se que, quando a resistência inserida pelo limitador é bem menor que a impedância de curto, o efeito é desprezível.

No segundo ensaio, observa-se a restauração do estado supercondutor do dispositivo, imediatamente após o restabelecimento da condição normal.

Por fim, no terceiro ensaio, em que o sistema apresenta condições de falta de baixa impedância, o limitador atua na limitação da corrente de falta de $14,0A$ para $8,5A$, tendo uma diminuição percentual na corrente de $39,2\%$, tornando o dispositivo muito mais eficiente. Verifica-se que, quanto mais severa for a falta, mais representativa é a atuação do limitador (impedância de curto-circuito da mesma ordem de grandeza da resistência imposta pelo limitador).

O dispositivo suportou correntes, aproximadamente, 7 vezes a sua corrente de falta, $2A$, em vários testes sem alterar suas características elétricas. Isso demonstra que o dispositivo possui rápida restauração e tem confiabilidade, não deteriorando a cerâmica.

Capítulo 7

Conclusões

Os comentários, conclusões e sugestões para próximos trabalhos presentes neste capítulo foram elaborados a partir da análise dos resultados obtidos dos ensaios realizados no limitador.

A metodologia para o projeto do DLCSC foi feita baseada em curvas características da cerâmica supercondutora obtidas através de ensaios. Foram realizados ensaios para obter o comportamento da densidade de corrente crítica em função da temperatura crítica. Com essa curva, foi possível determinar a densidade de corrente crítica que a cerâmica irá apresentar na temperatura de trabalho (77K) do limitador de corrente de falta. Além disso, foi realizado um estudo que determinou qual cerâmica, entre aquelas tratadas com pressão de oxigênio diferentes, apresenta a maior eficiência de transporte de corrente.

Além desses, foram realizados os ensaios para obter a temperatura crítica e a resistividade da cerâmica supercondutora que irá compor o dispositivo. A temperatura crítica foi obtida realizando o ensaio de susceptibilidade magnética AC em função da temperatura e a resistividade da cerâmica supercondutora foi obtida utilizando as curvas de resistividade em função da temperatura.

O protótipo confeccionado através destas curvas obtidas, foi ensaiado e através destes ensaios determinou-se que ele apresentava uma resistência média de 0.75Ω quando a corrente de falta ultrapassava a corrente de 2A, valores estes semelhantes àqueles obtidos no projeto teórico desenvolvido através das curvas características. Pode-se concluir então que a metodologia adotada neste trabalho para a confecção do projeto do limitador é viável sendo comprovada pelos ensaios realizados.

O dispositivo foi ensaiado em diferentes situações de falta respondendo rapidamente, introduzindo uma resistência no circuito limitando a corrente de falta. Da mesma maneira retorna rapidamente ao estado supercondutor quando a falta é eliminada.

Um outro resultado obtido, a partir dos ensaios realizados neste trabalho, foi que a cerâmica supercondutora $Hg_{0,82}Re_{0,18}Ba_2Ca_2Cu_3O_{8+\delta}$ é viável para esse tipo de aplicação, não apresentando sinais de degradação após as atuações nas faltas .

7.1 Próximos trabalhos

Para melhorar o desempenho do dispositivo, sugere-se, entre outros, como continuidade dos trabalhos:

- um estudo a respeito das juntas de conexões, enfocando a redução das perdas nestas regiões de transferência de corrente elétrica entre material supercondutor e o material convencional empregado. Estas perdas podem ser bastante reduzidas quando estas conexões são realizadas usando técnica de deposição;
- testar outros tipos de configuração para os dispositivos, tais como os com indutores acoplados, aumentando o valor da resistência a ser inserida no circuito;
- estudar a associação das cerâmicas em série, paralelo, visando aumentar a capacidade de limitação da corrente pelo dispositivo;
- analisar o sistema criogênico empregado, monitorando a reposição e liquefação do nitrogênio durante a operação contínua do limitador, conhecendo-se desta forma a autonomia criogênica do dispositivo.

Referências Bibliográficas

- [1] Ieee recommended practice for protection and coordination of industrial and commercial power systems. Em *IEEE Standard*, volume 242, EUA, Junho 2001.
- [2] V. Alexiades e A.D. Solomon. Mathematical modeling of melting and freezing processes. *Hemisphere Publishing Coorporation*, 1971.
- [3] L. D. andau e V. L. Ginzburg. On the theory of superconductivity. *Pergamon Press*, página 546, 1965.
- [4] J. Bardeen, L. N. Cooper e J. R Shcricffer. Theory of supercoductivity. *Phys. Rev.*, 108: 1175, 1957.
- [5] J. Brouchu. Interphase power controllers. *Citeq*, Hydro Québec and ABB - Polytechnic International Press, 2001.
- [6] M. Chen, L. Donzel, M. Lakner e W. Paul. High temperature superconductors for power applications. Em *Industrial Plenary Talk at Electroceramics VIII*, Roma, Agosto 2002.
- [7] W. Paul M. Chen, M. Lakner e J. Rhyner et al. Superconducting fault current limiter applications, technical and economical benefits, simulations and test results. *CIGRE*, 13-201, Paris 2000.
- [8] W. Paul M. Chen, M. Lakner e J. Rhyner et al. Fault current limiter based on high temperature superconductors - different concepts, test results, simulations, and applications. *PHYSICA C*, 354:27–33, 2001.
- [9] F. P. Costa e I.M. Santos. Vantagens do protetor por limitação de corrente - clip. *Revista Eletricidade Moderna*, 1990.
- [10] A. D’Ajuz, A. M. Monteiro, O. Kastrup e F. H. Oliveira. Dispositivos limitadores de curto-circuito (DLCC) - estado da arte e aplicação nas redes elétricas. *Relatório ONS*, 2002.
- [11] A. Sin et al. *Adv. Mater.*, 10:120, 1998.

- [12] A. Sin et al. Improvement of superconducting (Hg,Re)-1223 ceramics synthesised by the sealed quartz tube technique. *Physica C*, 328:80, 1999.
- [13] A. Sin et al. Influence of precursor oxygen stoichiometry on the formation of Hg, Re – 1223 superconductors. *Supercond. Sci. Technol.*, 12, 1999.
- [14] A.A.R. Fernandes et al. Scaling of critical currents in high-temperature superconducting superlattices and thin films. *Appl. Phys. Lett.*, 3181:61, 1992.
- [15] M.T.D. Orlando et al. $Hg_{0,82}Re_{0,18}Ba_2Ca_2Cu_3O_{8+\delta}$ superconductor: sample preparation and transport properties under hydrostatic pressure.
- [16] S. M. Loureiro et al. The importance of the precursor in high-pressure synthesis of Hg-based superconductors. *Physica C*, 272:94, 1996.
- [17] O. C. Ferreira. O sistema elétrico brasileiro, 2005. URL <http://ecen.com/eee32/sistelet.htm> .
- [18] V. L. Ginzburg. High-temperature superconductivity. *Modern Physics B*, 1:651, 1987.
- [19] J.L. Gonzáles, E.V.L. de Mello, E.S. Yague, M.T.D. Orlando e E. Baggio-Saitovitch. Pressure effects on the intergrain coupling in $(Tl_{0,5}Pb_{0,5})(Ba_{0,2}Sr_{0,8})_2Ca_2Cu_3O_y$ ceramic superconductor. *Physica C*, 384:102–110, 2003.
- [20] J.L. Gonzáles, M.T.D. Orlando, E.V.L. de Mello, E.S. Yague e E. Baggio-Saitovitch. Pressure dependence of the transport critical current density in optimally doped $Hg_{0,82}Re_{0,18}Ba_2Ca_2Cu_3O_{8+\delta}$ polycrystalline compound. *Solid State Communications*, 123:405–409, 2002.
- [21] V. Gor e D. Povh. SCCL - a new type of facts based short-circuit current limiter for application in high-voltage system. volume B4-209, Paris, 2004.
- [22] B. Gromoll. Resistive fault current limiters with YBCO films - 100 kva functional model. Em *Applied Superconductivity Conference*, Palm Springs, USA, 1998.
- [23] B. D. Josephson. Possible new effects in superconductive tunneling. *Phys. Lett.*, 1:251.
- [24] Sung-Hun Lim, Hyo-Sang Choi e Byoung-Sung Han. Fault current limiting characteristics due to winding direction between coil 1 and coil 2 in a flux-lock type SFCL. *Physica C*, 416:34–42, 2004.
- [25] Sung-Hun Lim, Hyo-Sang Choi e Byoung-Sung Han. Operational characteristics of a flux-lock-type high-Tc superconducting fault current limiter with a tap changer. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 14(1), Março 2004.

- [26] F Loundon. *Superfluids*, volume 1 e 2. 1950.
- [27] Andréia Maia Monteiro. *Um estudo de dispositivos limitadores de correntes de curto-circuito com ênfase no IPC (INTERPHASE POWER CONTROLLER)*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, fevereiro 2005.
- [28] M.T.D. Orlando, A.G. Cunha, S. L. Budko, A. Sin, L. G. Martinez, W. Vanoni, H. Belich, X. Obradors, F. G. Emmerich e E. Baggio-Saitovitch. $Hg_{0,95}Re_{0,05}Ba_2Ca_2Cu_3O_{8+\delta}$ superconductor: sample preparation and transport properties under hydrostatic pressures. *Supercond. Sci. Technol.*, 13:1177–1183, 2002.
- [29] C.A.C. Passos, M.T.D. Orlando, A.A.R. Fernandes, F.D.C. Oliveira, D.S.L. Simonetti, J. F. Fardin, H. Belich Jr e M.M. Ferreira Jr. *Physica C*, 419:25–31, 2005.
- [30] C.A.C. Passos, M.T.D. Orlando, F.D.C. Oliveira, P.C.M da Cruz, J.L. Passamai Jr, C.G.P. Orlando, N.A. Elói, H.P.S. Correa e L.G. Martinez. *Supercond. Sci. Technol.*, 15:1177–1183, 2002.
- [31] J.D. Rogers. Superconducting fault current limiter and inductor design. *IEEE Transactions on Magnetics*, Mag-19(3), May 1983.
- [32] M. P. Saravolac, K. Tekletsadik e A. Rowley. High temperature superconducting current limiting series reactor. *CIGRE*, 12-307, Paris 1998.
- [33] J. Schaffer. Triggered current limiters for closing bus tie, bypassing reactors and improving power quality.
- [34] J. Schaffer. Commutating current-limiters - an effective alternative for high current protection. *NETA World*, 18(4):7–18, 1996-97.
- [35] A. Sin, A.G. Cunha, A. Calleja, M.T.D. Orlando, F. G. Emmerich, E. Baggio-Saitovitch, S. L. Budko, M. Segarra, S. Pinol e X. Obradors. Influence of precursor oxygen stoichiometry on the formation of Hg,Re - 1223 superconductors. *Supercond. Sci.*, 12:120–127, 1999.
- [36] A. R. M Tenório e N. Jenkins. Explorando o tcsc como limitador de corrente de curto em sistemas de transmissão. *XIII ERLAC*, CE-13, Cidade do Leste, Paraguai 1999.
- [37] T.Matsumura, T.Uchii e Y.Yokomizu. Development of flux-lock-type fault current limiter with high-Tc superconducting element. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 7(2), Junho 1997.
- [38] V.Sokolovsky, V.Meerovich e I.Vajda. Superconducting FCL: Design and application. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 14(3):1990–2000, Setembro 2004.